



TITLE:

磁性薄膜記憶素子の研究(Dissertation_全文)

AUTHOR(S):

山中, 馥

CITATION:

山中, 馥. 磁性薄膜記憶素子の研究. 京都大学, 1972, 工学博士

ISSUE DATE:

1972-01-24

URL:

<https://doi.org/10.14989/doctor.r1919>

RIGHT:

磁性薄膜記憶素子の研究

1971年3月

山中 馥

第1章 総 論	1
1. 1 研究の必要性和本研究の範囲	1
1. 2 従来の主要な研究の動向	2
1. 3 本研究の目的と概要	6
第2章 平面形磁性薄膜による非破壊読出し記憶素子の研究	8
2. 1 序 論	8
2. 1. 1 平面形磁性薄膜の作製	8
2. 1. 2 磁化反転の基本特性	9
2. 1. 3 パルス応答のヒステリシス	13
2. 1. 4 本章の概要	20
2. 2 非破壊読出し特性の理論的検討	20
2. 2. 1 磁性薄膜の磁束密度法線成分の分布	20
2. 2. 2 影像磁極による容易軸方向磁界	23
2. 2. 3 影像磁極による磁界の減衰時定数	25
2. 2. 4 非破壊読出し特性の検討	27
2. 2. 5 本章の概要	36
2. 3 非破壊読出し特性の実験的検討	36
2. 3. 1 書込み特性	36
2. 3. 2 非破壊読出し特性	38
2. 3. 3 本章の概要	47
2. 4 非破壊読出し記憶平面の特性	47
2. 4. 1 記憶平面の設計	47
2. 4. 2 記憶平面の動作特性	53
2. 4. 3 動作領域拡大の検討	58
2. 4. 4 本章の概要	59

2. 5 結 論	60
第3章 円筒形磁性薄膜によるテープ・ケーブル形記憶素子の研究	62
3. 1 序 論	62
3. 1. 1 円筒形磁性薄膜の作製	62
3. 1. 2 容易軸方向の選定	65
3. 1. 3 テープ・ケーブル化の必要性	67
3. 1. 4 本章の概要	70
3. 2 磁性線テープ・ケーブルの検討	70
3. 2. 1 ケーブル構造と成形工程	70
3. 2. 2 磁性線ケーブルの試作	74
3. 2. 3 成形条件によるケーブル形状の変化	82
3. 2. 4 成形条件による記憶特性の変化	85
3. 2. 5 巻取りリール径による記憶特性の変化	103
3. 2. 6 磁性線ケーブルを用いた記憶平面の温度特性	103
3. 2. 7 本章の概要	109
3. 3 磁性線ケーブル記憶スタックの設計	113
3. 3. 1 設計の基本方針	113
3. 3. 2 語線構造の検討	113
3. 3. 3 語線の逆起電圧	118
3. 3. 4 磁性線ケーブルの端末および折返し処理	121
3. 3. 5 磁性線ケーブルの伝送特性	123
3. 3. 6 10万ビット記憶スタックの設計要項	125
3. 3. 7 本章の概要	129
3. 4 磁性線ケーブル記憶スタック基本特性の検討	130
3. 4. 1 磁性線ケーブルの特性	130
3. 4. 2 記憶スタックの伝送特性	130
3. 4. 3 回路構成	134
3. 4. 4 記憶スタックの動作特性	137
3. 4. 5 記憶スタックの温度特性	142

3. 4. 6 本章の概要	145
3. 5 部分実装装置による磁性線ケーブル記憶スタック動作速度の検討	148
3. 5. 1 装置構成の概要	148
3. 5. 2 動作速度の検討	157
3. 5. 3 動作電流振幅の許容範囲	161
3. 5. 4 本章の概要	164
3. 6 結 論	164
第4章 本研究の要約とその成果	166
謝 辞	166
文 献	167
発表論文一覧表	172

第1章 総 論

1.1 研究の必要性和本研究の範囲

薄膜状金属磁性体，すなわち磁性薄膜の記憶素子への応用に関する研究は，1955年に発表されたM. S. BLOIS⁽¹⁾による一軸異方性をもつパーマロイ蒸着薄膜についての先駆的な仕事にはじまって，各国において数多くの努力が重ねられてきた。磁性薄膜の応用についての関心は，主として，配向磁界中での蒸着によって磁性薄膜が一軸異方性をもつこと（磁界中電着によっても同様の性質が得られることが後に確認された），一方の安定点から他方への磁化反転が 10^{-9} 秒程度のきわめて短時間内に終了することなどから，大規模・高速電子計算機の記憶素子として適している点に集中されてきた。

いうまでもなく，記憶装置は，電子計算機や電子交換機など情報処理装置の主要構成部分のひとつであり，とくにJ. von NEUMANNの思想によるプログラム蓄積方式の観点からみて，情報処理装置の性能と経済性を左右するものといっても過言ではない。したがって，高速，大容量，高信頼性などの性能向上を経済的に達成しうる記憶素子の研究開発は，情報処理装置の高性能化と適応性の拡大にとって欠くことのできないものである。

磁性薄膜記憶の主要な長所は，さきにも述べた高速動作と，一括生産技術（Batch fabrication technics）の適用による経済性にあると考えられるが，研究開発における技術的課題は，次の3項目に大別することができる。

- (1) 磁性薄膜製造法に関する研究。
- (2) 記憶素子ならびに記憶平面および記憶スタックの動作方式，構成法，設計法に関する研究。
- (3) 周辺電子回路の構成法，設計法に関する研究。

このうち第二の課題が，本研究の主眼とするところであり，本論文の主要内容をなすものである。第一および第三の課題については，第二の課題と関連して必要とされる範囲について本論文で扱うこととする。

なお本論文は，筆者が日本電信電話公社電気通信研究所において1962年より1966年の間に実施した研究成果をとりまとめたものである。

1.2 従来の主要な研究の動向

磁性薄膜とその記憶装置への応用に関する研究が大きな注目と関心をあつめるようになったのは、1955年に発表されたM. S. BLOISの研究⁽¹⁾にはじまる。

BLOISは磁界中で真空蒸着によって作った厚み $0.1\mu\sim 10\mu$ の平面状パーマロイ薄膜が比較的低い保磁力と膜面内で配向磁界の方向に沿う一軸異方性をもつことを示し、磁化容易軸方向の方形ヒステリシスループを利用した電流一致選択方式による記憶素子を提案した。

BLOISの提案した動作方式は、容易軸方向に磁界を加えたときの磁壁移動にもとづく比較的遅い磁化反転によるものであり、従来からのフェライト記憶磁心の動作方式と本質的な相異はなかったが、ひきつづいてA. V. POHMとS. M. RUBENSは、容易軸方向磁界と直交する困難軸方向磁界の印加によって磁化の同時回転 (Coherent rotation) にもとづく超高速スイッチングが可能であることを示した。⁽²⁾

金属磁性体の物理的性質を解明しようとする基礎研究上の興味と、フェライト記憶磁心にかわる一括生産が可能な高速度記憶素子開発の要望とから、ひきつづいて数多くの研究が行なわれるようになった。

A. V. POHMらは、電流一致選択によって加えられる駆動磁界の印加方向に対して磁性薄膜の容易軸を傾けて配置することにより、等価的に困難軸方向成分をもつ駆動磁界をつくり出す動作方式を提案し、また記憶布線に対する印刷配線技術の適用をはじめて示した。⁽²⁾しかし容易軸から傾いた方向に対しては、磁性薄膜のヒステリシスループが電流一致選択方式に必要な方形特性を示さないこと、および半選択駆動磁界による磁化反転のクリープ現象 (Creeping) などによって、この動作方式によって安定な記憶動作を実現するには困難があった。

1959年になって、困難軸方向駆動磁界と直交して正または負の容易軸方向情報磁界を印加する動作方式がJ. I. RAFFELによって提案された。⁽³⁾この方式は線形選択方式によるものであり、電流一致選択方式に比較して番地選択回路の経済性の点で難点はあるが、高速動作に適しており、POHM-RUBENSの動作方式の困難を解決し、記憶布線が互いに直交する直線状の単純な構成をもつ利点もあって、以後この動作方式が磁性薄膜記憶において支配的となった。

磁化の同時回転による超高速スイッチングについては、D. O. SMITH, C. D. OLSON,⁽⁴⁾

A. V. POHM⁽⁵⁾らがエネルギー・モデルにもとづいてスイッチング臨界曲線がアステロイド (Asteroid) をなすことを示し、LANDAU-LIFSHITZ方程式⁽⁶⁾によって記述される 10^{-9} 秒程度のスイッチング時間が得られることを明らかにした。これは W. DIETRICH らによって、線路放電形パルス発生器とサンプリング・オシロスコープを用いて実験的にも確認された⁽⁷⁾。

記憶装置に用いられる磁性薄膜は、その形状からみて平面形と円筒形とに大別される。

平面形磁性薄膜による32語(語長10ビット)の記憶装置が1959年にはじめて電子計算機に実装され、サイクル時間0.8 μ s で運転をはじめた⁽⁸⁾。この記憶装置はガラス基板上に蒸着した円形スポット状の磁性薄膜によるものであるが、E. M. BRADLEYは金属基板に蒸着した連続薄膜が記憶平面組立ての簡易化に効果的であることを示し、また従来から用いられてきた成分比80%Ni-20%Fe付近のパーマロイに、3%程度のコバルトを添加した3元合金磁性薄膜が、磁気ひずみ係数を零に保ったまま、改善された記憶特性をもつことを報告した⁽⁹⁾。

わが国においても、ETL-MARK 6P 計算機用に8語(語長17ビット)の長方形スポット磁性薄膜記憶が⁽¹⁰⁾、またKTP 計算機用に128語(語長27ビット)の連続磁性薄膜記憶が試みられた⁽¹¹⁾。

円筒形磁性薄膜による記憶素子については、銀で被覆したガラス管にFe-Ni合金を電気めっきしたROD MEMORYが1959年にD. A. MEYER によって報告されたが⁽¹²⁾、これはほぼ等方性の磁性薄膜を電流一致方式による軸方向駆動磁界によって動作させるものであった。

異方性を利用する最初の磁性線記憶素子は、U. GIANOLAによって1958年に提案された⁽¹³⁾。これはひずみによる誘導磁気異方性をもつ金属線(Solid wire)を利用するのであり、その幾何学的形状から径のすべてにわたって均一なスイッチング磁界を加えられないため、不満足な特性しか得られなかった。円筒形状がこの点からみてほぼ理想的な形状であることは明らかである。1960年に、T. R. LONG は、非磁性金属線上に電気めっきした、円周方向に一軸異方性をもつ円筒状パーマロイ薄膜記憶素子を発表し、異方性磁界以下の大きさをもつ困難軸方向駆動磁界によって磁化を可逆回転させる非破壊読出しが可能であることを示した⁽¹⁴⁾。

また同じ年に、わが国においても、後藤らによって円周方向および軸方向に異方性をもつ円筒形磁性薄膜を銅線の上に電気めっきして形成し、パラメترون素子および二周波記憶

素子として応用する研究⁽⁴⁴⁾が行なわれた。

1963年には、大島、上林、前田、松下らによって円周方向に容易軸をもつパーマロイ薄膜電着線を多数平行に配列し、これと直交して駆動導線を布状に編組した織成磁性線記憶マトリクスについての研究が発表され、⁽¹⁵⁾⁽¹⁶⁾1964年には、ETL-MARK 6 計算機に0.5μsのサイクル時間をもつ64語(語長50ビット)の破壊読出し記憶が実装された。⁽¹⁷⁾

I. DANYLCHUKらは円周方向および軸方向にそれぞれ容易軸をもつ磁性線による記憶素子の相互比較、さらに平面形磁性薄膜記憶素子との相互比較を行ない、読出し出力レベル、記憶密度、外部妨害磁界に対する強さなどの点では、円周方向容易軸磁性線を用いた記憶素子がすぐれていることを論じた。⁽¹⁸⁾

電着磁性線は、生産性においてもすぐれた可能性をもっているが、連続した一括生産の利点を生かした、信頼性の高い、経済的な大容量記憶平面構成法の検討については問題が残されていた。

再現性をもって磁性薄膜を均一に製造する技術は、磁性薄膜記憶を実用化するにあたって必要な事項であるが、これに関連して一軸異方性の起源の解明は重要な課題のひとつである。L. NEEL⁽¹⁹⁾、谷口⁽²⁰⁾、近角⁽²¹⁾らによる原子対の方向性配列についての研究、D. O. SMITH⁽²²⁾、G. ROBINSON⁽²³⁾、高橋⁽²⁴⁾らによる結晶成長過程における磁性薄膜の内部構造についての研究、H. W. FULLER⁽²⁵⁾、M. S. MIDDELHOEK⁽²⁶⁾らによる異方性の微視的な変動についての研究などによって、異方性の起源についてはほぼ明らかにされた。

磁性薄膜の長期にわたる安定性については、1963年にR. C. FLAKERらが平面形および円筒形の蒸着パーマロイ薄膜について、温度が経時変化の加速要素であることを報告した⁽²⁷⁾。また1964年にJ. T. CHANGらは円筒形パーマロイ電着薄膜について検討を行ない、高温中での困難軸方向磁界印加が磁性薄膜の経時変化を促進する条件であり、この経時変化は磁界中熱処理を施すことによって解決できることを示した。⁽²⁸⁾

磁性薄膜の記憶動作に関連する問題点のひとつは、磁性薄膜の保磁力が、繰返して印加されるパルス磁界に対して低下するクリープ現象の存在である。1962年に、S. MIDDELHOEKは困難軸方向交流磁界が存在すると保磁力以下の容易軸方向磁界においても磁壁移動による磁化反転が次第に進行することを報告した⁽²⁹⁾。またW. DIETRICHはクリープ現象がパルス磁界の印加角度と波形に影響されることを示した⁽³⁰⁾。

筆者らもクリーブ現象の進行過程を連続的に観測しうる測定法を提案し、パルス波形、磁性薄膜の形状ならびに磁気特性、記憶平面構造などの影響を明らかにした。⁽³¹⁾ クリーブ現象の物理的機構については、それを説明するいくつかのモデルが提案されている⁽³²⁾⁽³³⁾⁽³⁴⁾。

非破壊読出し方式は、情報を読み出したあとでも同一情報を保持するのに再書き込み過程を必要としないために、再書き込みに必要な時間と、読出し増幅回路系の書き込み動作からの回復所要時間とに相当する時間を短縮することができて、高速化に有利である。また記憶情報の非破壊性を利用して、複数語をまとめて読出したのち読出し回路側で桁選択を行なうことにより、語駆動回路および番地選択素子の個数を減らし、全体として周辺回路の経済化をはかることができる。

非破壊読出し方式の研究方向のひとつは、磁性薄膜の磁化を静的な状態においたまゝで磁気光学効果や磁気抵抗効果を利用して情報を読出すものであり、R. L. CONGER⁽³⁵⁾らやP. HUIJER⁽³⁶⁾の研究があったが実用化されるにいたっていない。

他の手段は、磁性薄膜の磁化を可逆回転させることによって非破壊読出しを行うものである。

L. J. OAKLANDとT. D. ROSSINGは、1959年に、保磁力の異なる磁性薄膜を近接して配置し、保磁力の小さい方を読出し用、保磁力の大きい方を情報保持用とする非破壊読出し記憶を提案した⁽³⁷⁾。この方式は、情報書き込みにあって大電流駆動源を別に必要とし、書き込み所要時間も長くなるために、情報保持用永久磁石片を多数配列したカードを挿し替えられるようにした読出し専用記憶として発展した。平面形磁性薄膜による読出し専用記憶については渡辺⁽³⁸⁾などによって、また円筒形磁性薄膜による読出し専用記憶については中込、上林ら⁽³⁹⁾ならびに筆者ら⁽⁴⁰⁾によって研究が行なわれた。

OAKLANDにさきだって、一軸異方性をもつ磁性薄膜の困難軸方向に異方性磁界の大きさをこえない範囲で駆動磁界を印加して磁化を可逆回転させることによる非破壊読出し方式が、1958年にR. M. SANDERSとT. D. ROSSINGによって研究された⁽⁴³⁾。T. R. LONGは、さきに述べたように、円周方向に容易軸をもつ円筒形パーマロイ電着薄膜が、この方式による非破壊読出し記憶素子として動作しうることを示した⁽¹⁴⁾。

我が国においても、電着磁性線を用いた、この方式による4096語(10ビット)の記憶装置が前田、松下、高島らによって試作された。⁽⁴¹⁾

平面状連続磁性薄膜において、周辺磁区の漂遊磁界を復帰磁界として用いる非破壊読出し記憶の可能性は、1961年にJ. W. HARTによって研究された。⁽⁴²⁾

以上の非破壊読出し方式は、いずれも、駆動回路系が複雑になること、動作許容範囲がせまいこと、磁性薄膜に許される特性値のばらつきがきびしいこと、読出し電圧が小さいことなどの問題点があった。

1.3 本研究の目的と概要

本研究は、高性能で安定な磁性薄膜記憶の開発を目的として、磁性薄膜記憶素子における高速性の向上ならびに信頼性、経済性の改善について検討を行ったものである。

このために平面形磁性薄膜ならびに円筒形磁性薄膜を対象とし、前者については新しい非破壊読出し方式の開発による高速化に主眼をおき、また後者については電着磁性線のテープ・ケーブル化による大容量化と信頼性の向上に主眼をおいて、それぞれ研究を行ない、性能の良い磁性薄膜記憶素子を経済的に実現しうることを示した。

以下、各章、各節において取扱った事項の概要について述べる。

第1章においては、研究の必要性和本研究の範囲、従来の主要な研究の動向と本研究との関連、本研究の目的と成果の概要について述べた。

第2章においては、平面形磁性薄膜による非破壊読出し記憶素子に関する研究とその成果について述べた。

すなわち、2.1節では、平面形磁性薄膜の作製方法と、磁化反転の基本特性について述べたのち、金属導体上の平面形磁性薄膜について、異方性磁界をこえる大きさの困難軸方向駆動パルス磁界を加えても磁化が駆動磁界印加前にとっていた容易軸方向の向きを保存するように可逆回転する現象を発見し、この現象が近傍導体中の渦電流磁界にもとずくものと結論されるにいたった経過について述べた。

2.2節では、この現象の解明とこの現象を利用する非破壊読出し記憶素子についての解析とを行ない、基本的性質と特性を理論的に明らかにした。

2.3節では、書込み特性および非破壊読出し特性について実験的検討を行ない、理論と実験結果が一致することを示し、磁性薄膜に必要とされる磁気特性、記憶細胞の構造など、記憶平面設計に必要な基礎データを明らかにした。

2.4節では、小容量の記憶平面を設計試作し、安定した動作が超高速で得られることを示し、読出し、書込みとも同一駆動電流振幅で動作すること、駆動電流振幅の変動許容

範囲が広いこと、比較的大きい読出し電圧が得られること、記憶情報保持の信頼性が高いことなどを実証し、その成果を明らかにした。

2. 5節では、以上の成果の要約を述べた。

第3章においては、円筒形磁性薄膜によるテープ・ケーブル化した記憶素子に関する研究とその成果について述べた。

すなわち、3. 1節では、円筒形磁性薄膜記憶素子が簡単な布線構造で比較的大きい読出し電圧が得られることに着目し、比較的高い記憶密度が得られることから円周方向に容易軸をもつ電着磁性線を用い、大容量化、経済化、信頼性の向上に適合するテープ・ケーブル形記憶素子を開発するにいたった経過について述べた。

3. 2節では、磁性線の多数を同一平面上に平行に配列してポリエステル・フィルムで被覆した磁性線ケーブルを試作して実用的な記憶特性が得られることを示し、適切なケーブル製造条件を明らかにするとともに磁性線ケーブル記憶素子の温度特性を検討した。

3. 3節では、信頼性、経済性に重点をおいて、記憶容量10万ビット規模の磁性線ケーブル記憶スタックの電氣的、機構的設計について検討を行ない、設計要項をとりまとめた。

3. 4節では、語線テープ・ケーブルと磁性線ケーブルとをはり合わせて折りたゝむ構造とした記憶スタックを試作し、信号伝送特性、記憶動作特性、温度特性を検討して、設計目標を満足する性能を実現しうることを明らかにした。

3. 5節では、記憶スタックを部分実装した周辺回路に接続して動作速度の検討を行ない、動作速度を支配する時間的要因について分析し、設計目標をこえる動作速度が得られることを実証した。

3. 6節では、以上の成果の要約を述べた。

第4章においては、平面形磁性薄膜による非破壊読出し記憶素子の研究ならびに円筒形磁性薄膜によるフラット・ケーブル形記憶素子の研究から得られた結論を要約し、その成果について述べた。

第2章 平面形磁性薄膜による

非破壊読出し記憶素子の研究

2.1 序 論

2.1.1 平面形磁性薄膜の作製

磁性薄膜は真空蒸着法、電着法、スパッタ法などで作られる。いずれも、一般的にいて、金属をイオンまたは分子状にして基板上に折出させるものである。本研究において使用した磁性薄膜は、 $10^{-5} \sim 10^{-6}$ 程度の真空度が得られる市販の真空蒸着装置を用いて真空蒸着法により作製した膜厚 $500 \sim 2000 \text{ \AA}$ のパーマロイ薄膜である。

パーマロイはNi-Fe合金で、その重量組成比はほぼ80%-20%である。パーマロイ薄膜は一般に微結晶の集合体であり、これらの結晶方位は無秩序である。磁界中蒸着によって誘導される一軸異方性はこれらの結晶異方性と重畳してあらわれるから、一軸異方性の向きをそろえるためには結晶粒の大きさが小さく、結晶異方性の大きさが近似的に零であることが望ましい。前述の合金組成は結晶異方性と磁気ひずみを近似的に零にする成分比である。

蒸着源として、約20gの蒸着金属の母合金をアルミナるつぼに入れ、これを高周波加熱した。融点においてFeの蒸気圧はNiのそれよりも数倍高いために、蒸着膜と母合金では成分比が約1%程度異なる。このため蒸着膜の磁気ひずみ係数が零になるよう母合金組成比を調整する。

蒸着時の真空度と蒸着速度は、蒸着時の基板温度とあわせて、膜の成長機構にとって重要なパラメータである。真空度 $1 \sim 2 \times 10^{-5} \text{ mm Hg}$ で、蒸着速度は $20 \sim 40 \text{ \AA/sec}$ とした。蒸着源と基板との距離は約30cmである。

基板は大きさ約 $60 \times 60 \text{ mm}$ 、厚み0.2mmのガラス板を用いた。異方性磁界の大きさ、異方性角度分散などを小さくするために $200 \sim 450^\circ \text{C}$ に基板温度を維持することが必要であり、ここでは 300°C に設定した。蒸着中の配向磁界は異方性角度分散を小さくする目的から300e程度以上が必要であり、ヘルムホルツ・コイルによって500eの静

磁界を印加した。

蒸着膜の膜厚は、蒸着中においては基板の近傍に配置したモニタ用ガラスの電極間抵抗を測定することにより求めた。さらに蒸着終了後に多重干渉法⁽⁴⁵⁾により正確に測定した。磁気特性は主として 50 Hz ヒステリシスループ・トレーサによって、異方性磁界 H_K 、保磁力 H_c および角度分散 α_{90} を測定した。角度分散の測定は CROWTHER の方法⁽⁴⁶⁾によった。

2. 1. 2 磁化反転の基本特性

単一磁区状態における磁性薄膜の磁化の向きは、膜面内における外部磁界の関数として STONER-WOHLFARTH によってあたえられた回転円体の磁化反転過程⁽⁴⁷⁾における同じように、計算することができる。

いま K を異方性定数として、磁化が容易軸となす角度を θ とすると、一軸異方性エネルギー E_K は

$$E_K = K \sin^2 \theta \quad (2.1)$$

で表わされる。

外部磁界の容易軸方向成分を H_L 、困難軸方向成分を H_T とすると、飽和磁化の大きさを M_s として、磁性薄膜の単位体積あたりの全エネルギー E は

$$E = K \sin^2 \theta - M_s H_L \cos \theta - M_s H_T \sin \theta \quad (2.2)$$

であたえられる。ただし磁性薄膜の二次元的構造から膜厚方向には非常に大きい減磁力をもつので、磁化は膜面内にあって膜厚方向成分をもたないものとした。

加えられた外部磁界に対して安定な θ が存在するためには、 E が極小になる条件を満足しなければならない。すなわち

$$\begin{aligned} \partial E / \partial \theta &= 2K \sin \theta \cos \theta + M_s H_L \sin \theta - M_s H_T \cos \theta \\ &= 0 \end{aligned} \quad (2.3)$$

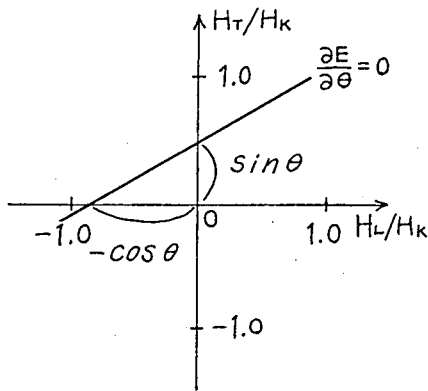
こゝで異方性磁界 H_K を

$$H_K \equiv 2K / M_s \quad (2.4)$$

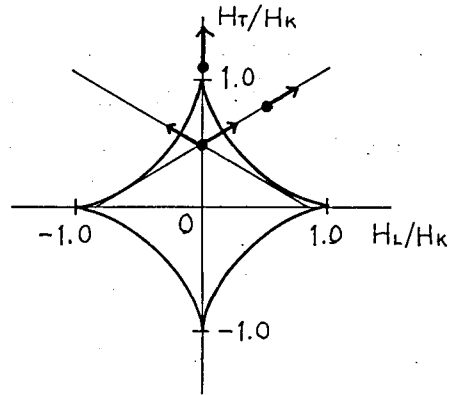
と定義すると、式(2.3)より

$$-\frac{H_L / H_K}{\cos \theta} + \frac{H_T / H_K}{\sin \theta} = 1 \quad (2.5)$$

が得られる。この直線は $(H_L / H_K) - (H_T / H_K)$ 平面上で、図 2.1 (a) に示すように、



(a)



(b)

図 2.1 一軸異方性をもつ磁性薄膜の
スイッチング臨界曲線

$[0, \sin \theta]$ および $[-\cos \theta, 0]$ を通過し、この直線上の各点はすべて $\partial E / \partial \theta = 0$ を満足する。 $\partial^2 E / \partial \theta^2 > 0$ のとき、この直線上の点はエネルギー極小の条件を満足し、 θ は安定である。安定状態から不安定状態への遷移は $\partial^2 E / \partial \theta^2 = 0$ でおきる。すなわち

$$\partial^2 E / \partial \theta^2 = 2K(\cos^2 \theta - \sin^2 \theta) + Ms H_L \cos \theta + Ms H_T \sin \theta = 0$$

(2.6)

したがって式(2.3)と式(2.6)とから

$$H_L / H_K = \cos^3 \theta$$

$$H_T / H_K = \sin^3 \theta$$

(2.7)

が得られる。

式(2.7)の曲線はアステロイドであり、図2.1(b)に示すように、その頂点は $(\pm 1, 0)$ および $(0, \pm 1)$ に存在する。また式(2.5)の直線はこのアステロイドの切線である。したがって H_K で正規化された外部磁界 $[H_L / H_K, H_T / H_K]$ があたえられたとき、磁化の向きは、図2.1(b)に示すように、アステロイドに切線をひいて図式的に求めることができる。

外部磁界ベクトルの頂点が、式(2.7)で示されるスイッチング臨界曲線の内部にあ

るとき、磁化ベクトルの方向は2つの安定値をもつが、磁界ベクトルの頂点が臨界曲線の外部に移ると、1つの安定値のみをもつ。したがって、容易軸にそって正または負の方向にむいている磁化に対してパルス磁界が加えられると、磁界ベクトルの頂点が臨界曲線の内部にあるときは磁化は可逆回転するが、頂点が外部にあるとこの可逆性が失なわれる。

外部磁界が容易軸方向にのみ加えられるときには、式(2.2)において $H_T = 0$ として、 $\partial E / \partial \theta = \partial^2 E / \partial \theta^2 = 0$ から次の解が得られる。

$$\left. \begin{aligned} \theta &= 0, & -1 < H_L / H_K & \text{のとき} \\ &= \pi, & 1 > H_L / H_K & \text{のとき} \end{aligned} \right\} \quad (2.8)$$

磁化の容易軸方向成分 M_L は、 $M_L = M_s \cos \theta$ であるから

$$M_L = \pm M_s \quad (2.9)$$

である。

外部磁界が困難軸方向にのみ加えられるときには、式(2.2)において $H_L = 0$ として、 $\partial E / \partial \theta = \partial^2 E / \partial \theta^2 = 0$ から

$$\left. \begin{aligned} \theta &= \sin^{-1} H_T / H_K, & 1 \geq |H_T / H_K| & \text{のとき} \\ &= \pm \frac{\pi}{2}, & \pm 1 \leq H_T / H_K & \text{のとき} \end{aligned} \right\} \quad (2.10)$$

が得られる。磁化の困難軸方向成分 M_T は、 $M_T = M_s \sin \theta$ であるから

$$\left. \begin{aligned} M_T &= M_s \cdot H_T / H_K, & 1 \geq |H_T / H_K| & \text{のとき} \\ &= \pm M_s, & \pm 1 \leq H_T / H_K & \text{のとき} \end{aligned} \right\} \quad (2.11)$$

となる。

容易軸方向および困難軸方向ヒステリシスループの理論曲線を図2.2(a)および(b)に示した。また比較のために実験によって得られるループの形状を図2.3(a)および(b)に示した。困難軸方向ループは良い一致を示すが、容易軸方向ループの保持力は理論値よりも小さい。これは容易軸方向においては多くの場合、磁化反転が磁化回転よりも磁壁移動によってさきにおきるからである。

同じように実際の磁化反転過程は、磁性薄膜が含む種々の欠陥のために、図2.4に示すようになる。⁽⁴⁸⁾ すなわち、スイッチング臨界曲線の近傍では、主として異方性分散に原因する非同時回転(Incoherent rotation)によるスイッチングの領域が存在する。また保持力以下の容易軸方向磁界が加わった状態においても、たとえば困難軸方向交流磁界が存在すると、ゆっくりとした磁壁移動による反転が進行するクリープ領域(Creep region)が存在する。クリープは、後に述べるように、記憶素子の動作余裕度を制限す

る重要な事項である。

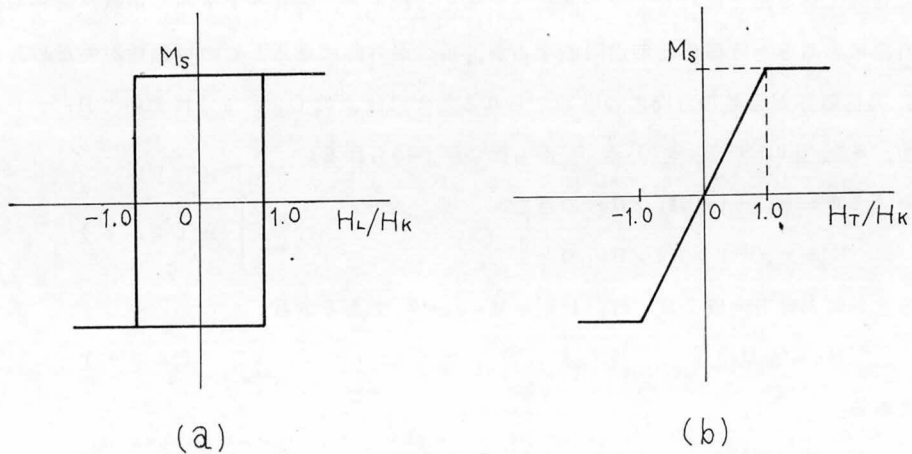


図 2.2 容易軸方向(a)および困難軸方向(b)の
理論ヒステリシスループ

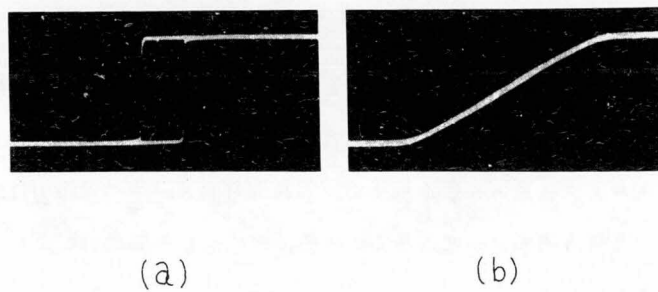


図 2.3 容易軸方向(a)および困難軸方向(b)の
実測ヒステリシスループ

2. 1. 3 パルス応答のヒステ

リシス

2.1.2で述べたように、一般に磁性薄膜に加える外部磁界ベクトルの頂点がスイッチング臨界曲線の内部にあるとき磁化は可逆回転し、磁界ベクトルの頂点が臨界曲線の外部にあるとき磁化は非可逆回転する。

いま、異方性磁界を十分にこえる大きさの困難軸方向駆動磁界を加えると、磁化ベクトルは、容易軸に沿

って正または負の向きに単一磁区を形成するように整列していた状態から回転して、困難軸方向に整列する。

つぎに駆動磁界をとり去るとき、正または負の微少な容易軸方向磁界を加えると、磁化ベクトルはこの磁界に操舵(Steering)されて回転し、正または負の容易軸方向に沿って単一磁区を形成するように整列して安定する。

このとき、磁化ベクトルの回転方向を制御する容易軸方向磁界があたえられないと、磁化は容易軸方向に沿う正の向きをとるものと負の向きをとるものとに細分され、互いに反対方向にばらばらに回転し、磁性薄膜はもはや単一磁区を形成しない。

容易軸方向操舵磁界を外部から加えるかわりに、駆動磁界を磁性薄膜の困難軸から傾けて加えることにより、等価的に容易軸方向磁界をつくり出すことができる(図2.5(a))。

これらの様子は、困難軸方向に沿って磁性薄膜をとりかこむ巻線を設けて読出し線とし、この読出し線と鎖交する容易軸方向磁束の時間的変化をパルス電圧応答としてとり出すことにより観測することができる。この様子を図2.5(b)に示した。

しかし、異方性磁界を十分にこえる大きさの困難軸方向駆動磁界を加えたあとでも、磁化が、駆動磁界を加えるまえにとっていた容易軸の向きに復帰する可逆回転現象を示すことを筆者は見いだし⁽⁴⁹⁾⁽⁵⁰⁾⁽⁵¹⁾、この現象を利用する非破壊読出し記憶方式を提案した。

すなわち、ガラス基板上に蒸着したパーマロイ薄膜を、図2.6に示す測定パルス系列によって、あらかじめ容易軸方向の一方の向きに飽和させた後、困難軸方向パルス磁界を加えてその後縁における読出し電圧を観測すると、困難軸に対する駆動磁界の印加角度に

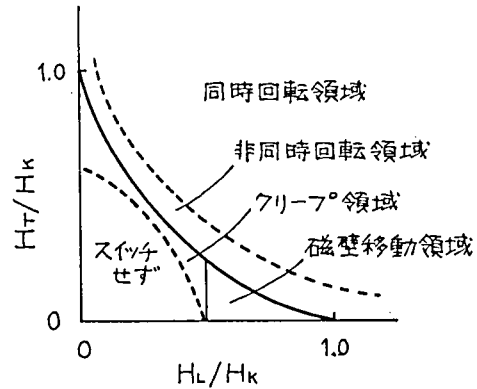


図 2.4 磁性薄膜の磁化反転過程

対して図 2.7 の点線で示すようなヒステリシスループが得られた。読出し電圧波形の一例を図 2.8 に示す。

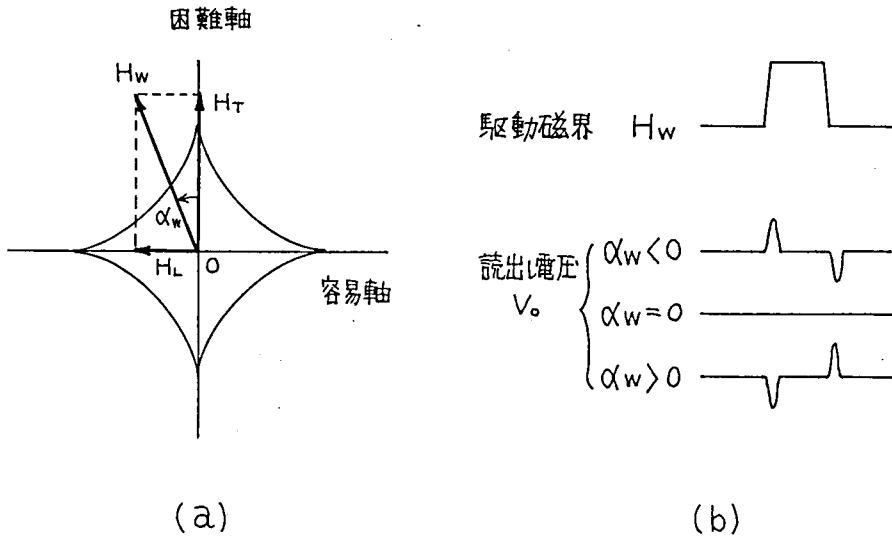


図 2.5 磁性薄膜のパルス応答

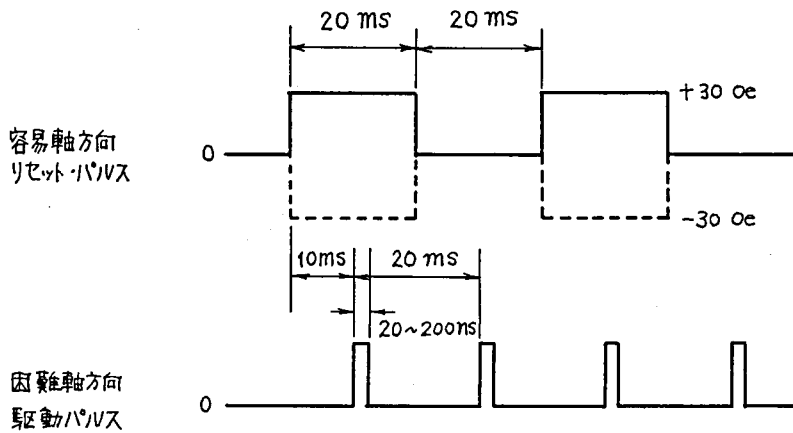


図 2.6 測定パルス系列

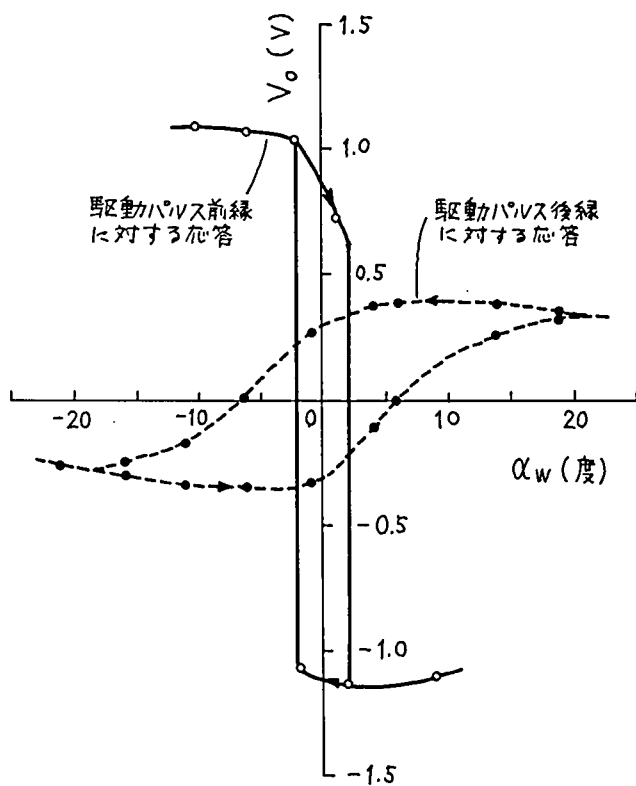


図 2.7 駆動パルス印加角度 α_w に対する読出し電圧 V_o 。

磁性薄膜；厚み 2000\AA ， $8 \times 8\text{mm}$ ， $H_K = 2.9\text{ Oe}$ ，

$H_c = 0.8\text{ Oe}$ ， $\alpha_{80} = 2^\circ 4'$ 。

駆動磁界； $H_w = 1.5 H_K$ ，パルス幅 20 ns 。

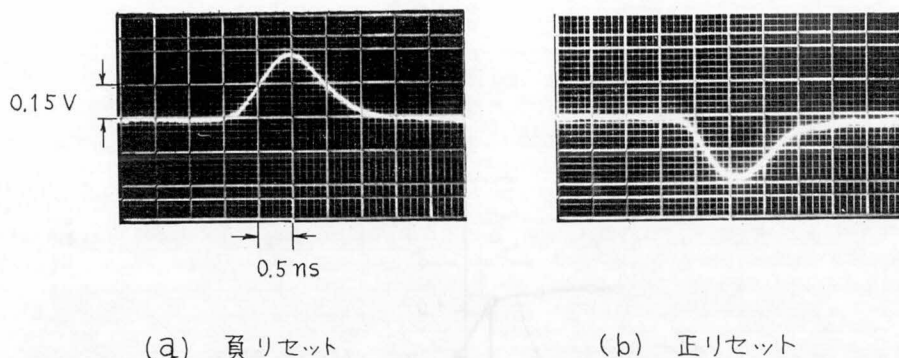


図 2.8 $\alpha_w=0$ における駆動パルス後縁
に対する読出し電圧波形

パーマロイ薄膜は、図 2.9 に示す終端短絡した平行平板形ストリップ線路（導体幅 12 mm，導体厚み 2 mm，導体間隔 2 mm，特性インピーダンス $Z_0=50\Omega$ ）のほぼ中央に挿入し，この線路にパルス電流を流して困難軸方向駆動磁界を試料に加えた。試料の読出し電圧は，ストリップ線路と直交して配置した読出し線によって検出した⁽⁷⁾⁽⁵²⁾。

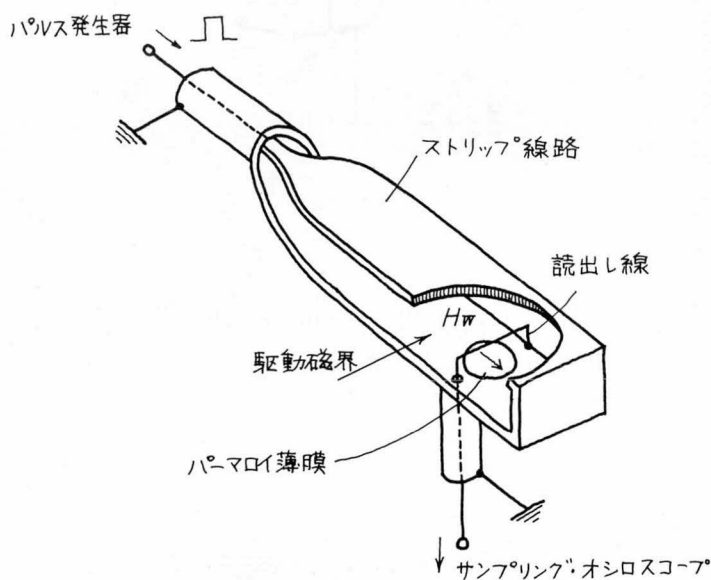


図 2.9 磁性薄膜駆動用ストリップ線路

駆動パルス源は、繰返し周波数 50 Hz の線路放電形パルス発生器であって、駆動パルスの立上り時間 t_r は 0.7 ns, 立下り時間 t_f は 4.4 ns である。パルス応答の観測装置としては分解時間 0.3 ns のサンプリング・オシロスコープを使用した。地磁気の補償および容易軸方向リセット磁界の付与は 2 組のヘルムホルツ・コイルによって行なった。

図 2.7 の実線で示した曲線は、図 2.6 の測定パルス系列において容易軸方向リセット磁界をとり去った状態で、駆動パルス前縁における読出し電圧をプロットしたものである。この場合には、読出し電圧の正から負、または負から正への転移はなだらかでなく急峻で、またヒステリシスの零交差点の間隔は点線の場合よりも小さい。

これらのヒステリシスは、記憶情報を読出したあとも記憶内容が破壊されることなくひきつづいて連続的に非破壊読出しが可能であるように、最初とっていた容易軸の向きに磁化をひきこむ何らかの容易軸方向操舵磁界が働いていることを意味している。

等価的に容易軸方向磁界がつくり出される機構を説明するモデルとして、次の 3 つを検討した。

- (1) 異方性磁界の振幅分散
- (2) 反磁区磁壁による漂遊磁界
- (3) 渦電流磁界

このうち第 1 項は、異方性磁界の振幅分散にもとづく比較的異方性磁界の大きい微少部分が、大きい困難軸方向駆動磁界に対してもなお可逆回転を行ない、相互作用にもとづく引き込みによって記憶情報を保存すると考えるモデルである。しかし駆動磁界振幅に対する反転磁束量は 1.4 Hk 程度で充分飽和しており、3.5 Hk の大きさの駆動磁界を加えても同一現象を示すことから、このモデルは否定された⁽⁴⁹⁾

第 2 項は、減磁力によって磁性薄膜の縁に形成される湾曲した糸状反磁区の磁壁による漂遊磁界が容易軸方向磁界を提供すると考えるモデルである⁽⁴⁹⁾。このモデルも以下に述べる実験的事実を説明するのに困難があり、否定された。

第 3 項は、磁性薄膜のスイッチングによって近傍導体中に誘起される渦電流にもとづく容易軸方向磁界が原因であるとするモデル⁽⁵³⁾⁽⁵⁴⁾であって、以下に述べる実験的事実からその正しさが確認された。

図 2.10(a)は、図 2.7 におけると同じ駆動条件下における読出し電圧のヒステリシスループである。このとき磁性薄膜の膜面に密着して厚み 50 μ の銅板をおくと、図 2.10(b)に示すように、ヒステリシスの幅が広がる。読出し電圧の振幅が図 2.10(a)におけるより

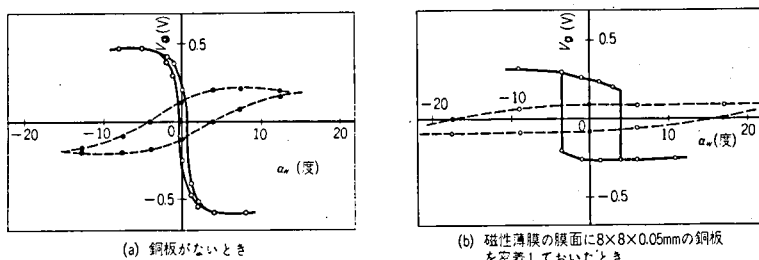


図 2.10 近傍導体によるヒステリシス特性の変化。

磁性薄膜；厚み 2000 \AA ， $4 \times 4 \text{ mm}$ ， $H_K = 2.9 \text{ Oe}$ ，

$$H_c = 0.8 \text{ Oe}，\alpha_{80} = 2^\circ 4'$$

駆動磁界； $H_w = 1.5 H_K$ ，パルス幅 20 ns 。

も減少しているのは、磁性薄膜の膜面上におかれた銅板によって駆動パルス磁界がしゃへいされ、磁性薄膜に加わる有効な駆動磁界の大きさが減少しているためと考えられる。

図 2.11 (a) は 50μ 厚の銅板を密着させた状態で困難軸方向駆動パルス磁界を加え、これと重畳する容易軸方向直流磁界 H_L を変化したときの読出し電圧のプロットである。ヒステリシスループは、サンプリング・オシロスコープを利用して読出し電圧のせん頭値をストローブして保持回路に入れ、XY 記録計で自動記録して得た。また図 2.11 (b) は 3μ 厚の銀蒸着膜を密着させたときの特性である。いずれにおいても、駆動パルス幅が長くなると、ヒステリシスの幅は次第に減少してついには消失してしまう。

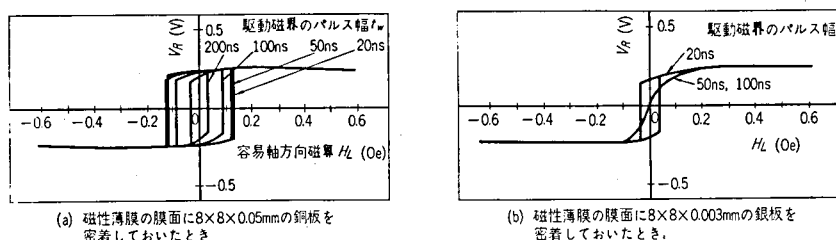


図 2.11 駆動磁界パルス幅によるヒステリシス特性の変化。

磁性薄膜，駆動磁界；図 2.10 に同じ。

以上の実験結果を要約すると次のようになる。

- (1) 磁性薄膜に近接して配置した金属導体はヒステリシスループの幅を広げる。
- (2) 金属導体が大きいほどヒステリシスループの幅が広い。
- (3) 駆動パルス幅が広くなるとヒステリシスループの幅はせまくなる。

これらの結果から、磁性薄膜の磁化の困難軸方向スイッチングによって、磁性薄膜の近くに位置する導体中に渦電流が誘起し、この渦電流によって作られる容易軸方向磁界が時間とともに減衰しながら駆動パルス磁界の終了期に作用して、磁性薄膜の磁化の向きをリセットするように働くモデルを考えることができる。駆動パルス幅が長くなって、リセットするに必要なしきい値以下に容易軸方向磁界が減衰すると、ヒステリシスは消失してしまう。また減衰時定数は近傍導体の大きさに左右され、導体寸法が大きいほど時定数は大きい。

すなわち、図 2.1 2 (a) に示すように、単一磁区からなる磁性薄膜の直下に平板状導体

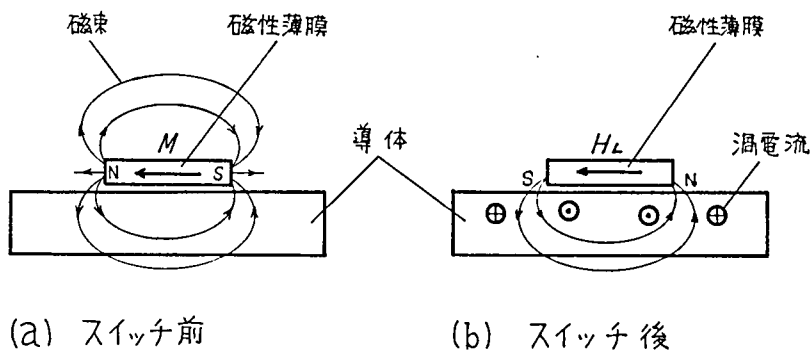


図 2.1 2 導体板上においた磁性薄膜の
容易軸方向断面図

おかれているとすると、定常状態では磁性薄膜両端の自由磁極からの磁束が導体をつらぬいている。

いま困難軸方向に H_K をこえる駆動磁界が加えられると、磁性薄膜の磁化は困難軸方向にスイッチして、容易軸方向両端の自由磁極はなくなってしまいます。このとき導体中の磁束分布を維持するように、この磁束をとりまく渦電流が過渡的に流れる（図 2.1 2 (b)）。導体の境界面においては磁束の法線成分連続の条件が満足されなければならないから、いままでは自由磁極が存在していた磁性薄膜の容易軸方向両端直下の導体表面には、渦電流によ

って等価的に影像磁極があらわれる。この影像磁極がつくる容易軸方向磁界の向きは、磁性薄膜の磁化をリセットする向きである。

以上に述べた実験と考察の結果から、非破壊読出し動作は、磁性薄膜近傍導体の渦電流にもとづくものであることを結論した。

2. 1. 4 本章の概要

本研究において用いた平面形磁性薄膜の蒸着による作製方法について述べ、一般的に磁性薄膜における磁化反転の基本的特性について、エネルギー方程式を用いて説明した。

さらに異方性磁界をこえる大きさの困難軸方向パルス磁界を加えても、磁性薄膜の磁化がパルス磁界印加前にとっていた容易軸方向に沿う向きを保存するように可逆回転する現象について述べ、実験結果から、この非破壊読出し現象は、磁性薄膜のスイッチングによって近傍導体中に誘起される渦電流のために容易軸方向磁界が困難軸方向パルス磁界の終了期に作用して、自動的に再書き込みが行なわれることに原因することを結論した。

2. 2 非破壊読出し特性の理論的検討

2. 2. 1 磁性薄膜の磁束密度法線成分の分布

磁性薄膜近傍導体中の渦電流による影像磁極がつくる容易軸方向磁界の初期値を求めるために、まず導体表面に仮想的にあらわれる磁荷の面密度を求める。この磁荷の面密度は導体表面における磁束密度の法線成分にほかならない。

図 2.1.3 において、方形状磁性薄膜は x 方向に一軸異方性を持ち、磁化 M が

$$M = -M_x i \quad (2.1.2)$$

であらわされるものとする。ここで i は x 方向の単位ベクトルである。また磁性薄膜の厚み f は幅 a および長さ b に比べて無視できるものとし、磁荷は一様な線密度 m をもって両端に分布しているものとする。ここで m は

$$m = B_s f \quad (2.1.3)$$

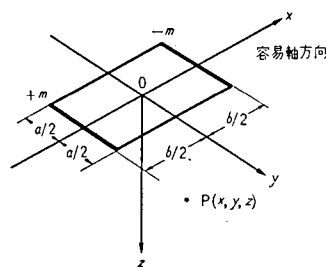


図 2.1.3 空間に配置した方形磁性薄膜

であたえられる。飽和磁束密度 B_s は、成分比 80% Ni - 20% Fe のパーマロイではほぼ 1 Wb/m^2 である。

任意の点 $P(x, y, z)$ におけるスカラー・ポテンシャル $\phi(x, y, z)$ は、 μ_0 を真空の透磁率として

$$\phi(x, y, z) = \frac{m}{4\pi\mu_0} \int_{-a/2}^{a/2} \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) d\beta \quad (2.14)$$

であたえられる。ここで

$$\left. \begin{aligned} r_1 &= \left[\left(x - \frac{b}{2} \right)^2 + (y - \beta)^2 + z^2 \right]^{1/2} \\ r_2 &= \left[\left(x + \frac{b}{2} \right)^2 + (y - \beta)^2 + z^2 \right]^{1/2} \end{aligned} \right\} \quad (2.15)$$

である。

したがって

$$\phi(x, y, z) = \frac{m}{4\pi\mu_0} \cdot \ln \frac{(y + (a/2) + R_2)(y - (a/2) + R_3)}{(y - (a/2) + R_1)(y + (a/2) + R_4)} \quad (2.16)$$

ここで

$$\left. \begin{aligned} R_1 &= [(x + (b/2))^2 + (y - (a/2))^2 + z^2]^{1/2} \\ R_2 &= [(x + (b/2))^2 + (y + (a/2))^2 + z^2]^{1/2} \\ R_3 &= [(x - (b/2))^2 + (y - (a/2))^2 + z^2]^{1/2} \\ R_4 &= [(x - (b/2))^2 + (y + (a/2))^2 + z^2]^{1/2} \end{aligned} \right\} \quad (2.17)$$

とした。

z 方向の磁束密度 $B_z(x, y, z)$ は、 μ を媒質の透磁率として $B_z = -\mu \cdot \partial \phi / \partial z$ から

$$B_z = \frac{B_s f \mu}{4\pi\mu_0} z \left[\frac{1}{(y - (a/2) + R_1) R_1} + \frac{1}{(y + (a/2) + R_2) R_2} - \frac{1}{(y - (a/2) + R_3) R_3} - \frac{1}{(y + (a/2) + R_4) R_4} \right] \quad (2.18)$$

として得られる。非磁性金属では $\mu \simeq \mu_0$ である。

$y = 0$ における容易軸に沿う B_z の分布の計算値の一例を図 2.14 に示した。式 (2.18) から $|B_z|$ の分布曲線が極大値をとる x の値と、そのまわりでの B_z 分布曲線の半値幅を求めると、 $x = \pm b/2$ および $2z$ が得られる。

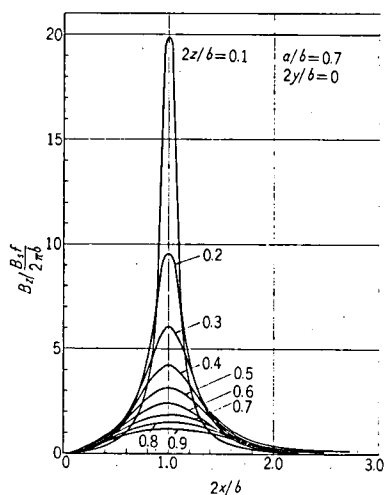


図 2.14 磁束密度 $B_z(x, 0, z)$ の
容易軸に沿う分布

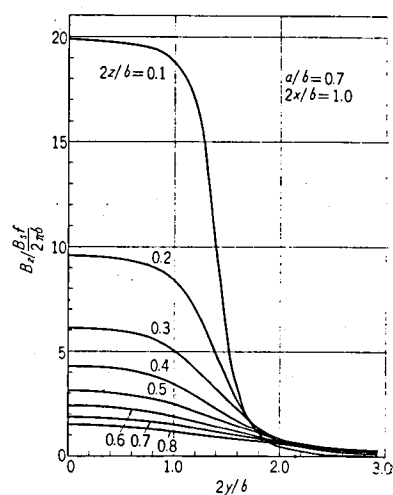


図 2.15 磁束密度 $B_z(b/2, y, z)$ の
困難軸に沿う分布

図 2.15 は、 $x = \pm b/2$ における困難軸に沿う B_z の分布の計算値である。同じく式 (2.18) から $|B_z|$ の分布が極大値をとる y の値と、そのまわりでの分布曲線の半値幅として、 $y = 0$ および a が得られる。 $y < |a/2|$ の範囲内では B_z は比較的一様な分布をもっている。

したがって、図 2.16 に示すように、磁性薄膜から $z = d$ だけ離れた平面導体の表面における B_z の分布は、磁性薄膜の両端磁極の直下において、幅 a と長さ $2d$ の領域に局所的に存在して一様な値をもっていると近似的に考えることができる。

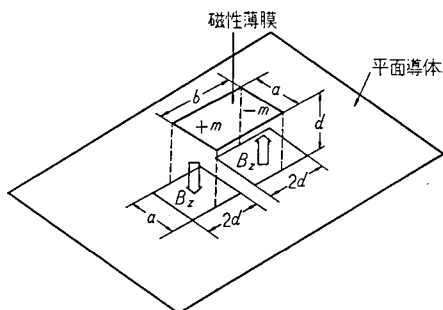


図 2.16 平面導体上における B_z
の局在領域

2. 2. 2 影像磁極による容易軸方向磁界

磁荷 $\pm m'$ が、図 2.17 に示すように、 $x-y$ 平面上で中心間隔 b をへだてて幅 a と長さ $2d$ の間に分布しているとき、任意の点 $Q(x, y, z)$ における磁界の x 軸成分 H_0 を求める。

式 (2.16) から $H_x = -\partial \phi / \partial x$ を求め、これを x について $-d$ から d まで積分することにより、磁荷の面密度を ω_m として

$$H_0(x, y, z) = \frac{\omega_m}{4\pi\mu_0} \left\{ \ln |L_1 + y - (a/2)| - \ln |L_2 + y - (a/2)| - \ln |L_3 + y + (a/2)| + \ln |L_4 + y + (a/2)| + \ln |L_5 + y + (a/2)| - \ln |L_6 + y + (a/2)| - \ln |L_7 + y - (a/2)| + \ln |L_8 + y - (a/2)| \right\} \quad (2.19)$$

がえられる。こゝで

$$\left. \begin{aligned} L_1 &= [(x + (b/2) + d)^2 + (y - (a/2))^2 + z^2]^{1/2} \\ L_2 &= [(x + (b/2) - d)^2 + (y - (a/2))^2 + z^2]^{1/2} \\ L_3 &= [(x + (b/2) + d)^2 + (y + (a/2))^2 + z^2]^{1/2} \\ L_4 &= [(x + (b/2) - d)^2 + (y + (a/2))^2 + z^2]^{1/2} \\ L_5 &= [(x - (b/2) + d)^2 + (y + (a/2))^2 + z^2]^{1/2} \\ L_6 &= [(x - (b/2) - d)^2 + (y + (a/2))^2 + z^2]^{1/2} \\ L_7 &= [(x - (b/2) + d)^2 + (y - (a/2))^2 + z^2]^{1/2} \\ L_8 &= [(x - (b/2) - d)^2 + (y - (a/2))^2 + z^2]^{1/2} \end{aligned} \right\} \quad (2.20)$$

である。

したがって、 $z = d$ とし磁荷の面密度 ω_m を式 (2.18) の B_z とすると、式 (2.19) は渦電流にもとずく影像磁極がつくりだす容易軸方向磁界の初期値をあたえる。

$y = 0$ における H_0 の x 軸に沿う分布の計算値の一例を図 2.18 に示した。

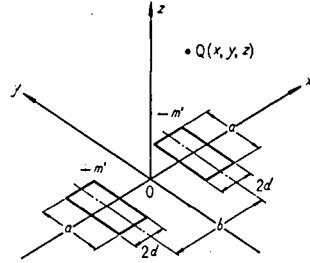


図 2.17 影像磁極の分布

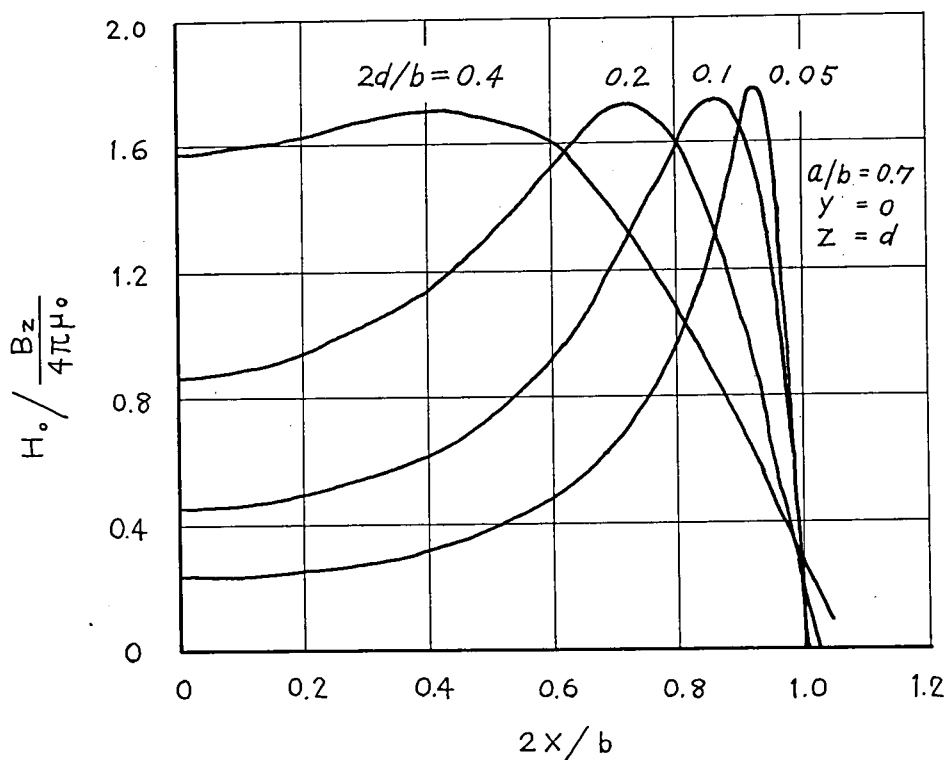


図 2.18 影像磁極による容易軸方向磁界

$H_0(x, 0, d)$ の分布

磁性薄膜全体を単一磁区とするように働らく実効的な容易軸方向操舵磁界の大きさとし
て、図 2.18 の曲線の積分平均値 $\overline{H_0}$,

$$\overline{H_0} = \frac{1}{b} \int_{-b/2}^{+b/2} H_0(x, 0, d) dx \quad (2.21)$$

をとることにして、その計算値の一例を図 2.19 に示した。

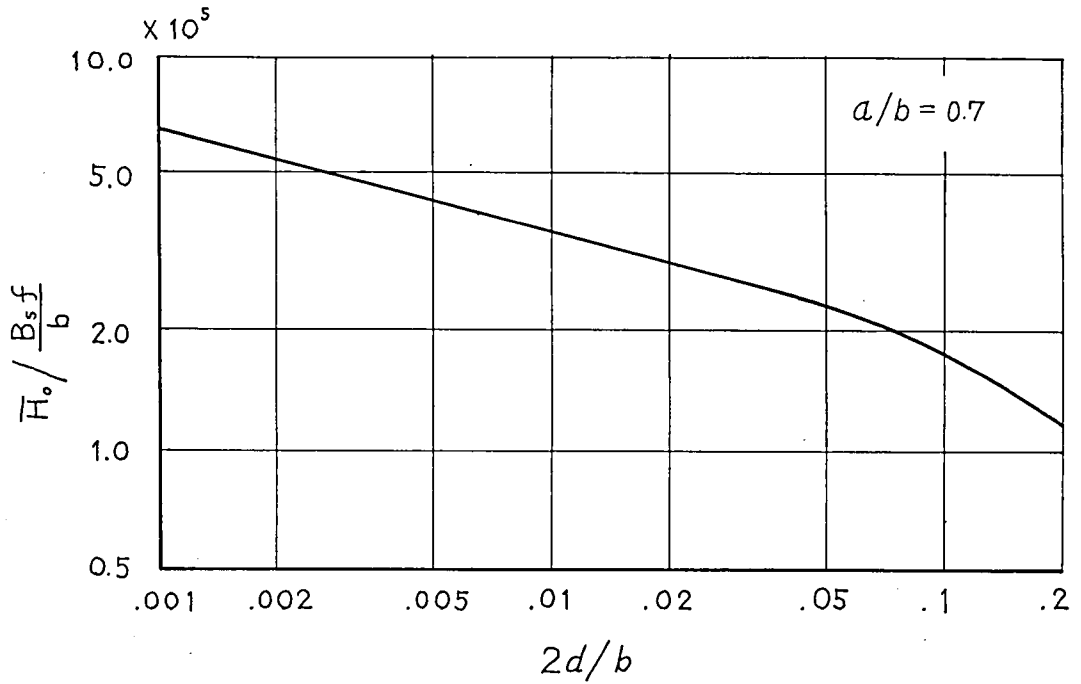


図 2.19 影像磁極による容易軸方向磁界

$H_0(x, 0, d)$ の積分平均値 \bar{H}_0

2. 2. 3 影像磁極による磁界の減衰時定数

外部磁界の時間的変化が遅く、変位電流が伝導電流に比べて無視できる準定常的な電磁界の中におかれている導体について考える。このときには電磁方程式は近似的に次式であらわされる。

$$\text{rot } \mathbf{H} = \mathbf{i} = \mathbf{E} / \rho$$

$$\mathbf{B} = \mu \mathbf{H}$$

$$\text{div } \mathbf{B} = 0$$

$$\text{rot } \mathbf{E} = -\partial \mathbf{B} / \partial t$$

(2. 22)

ここで \mathbf{H} は磁界の強さ、 \mathbf{B} は磁束密度、 \mathbf{E} は電磁誘導による電界の強さ、 \mathbf{i} は電磁誘導による渦電流密度、 μ と ρ は媒質の透磁率および抵抗率、 t は時間である。これらから

$$\nabla^2 \mathbf{B} = \mu / \rho \cdot \partial \mathbf{B} / \partial t$$

(2. 23)

が得られる。

導体表面での境界条件は \mathbf{B} の法線成分を B_{n1} , B_{n2} として

$$B_{n1} = B_{n2}$$

(2. 24)

である。

座標系を (x, y, z) として式 (2.23) の解を

$$B(x, y, z, t) = B_m(x, y, z) \cdot T(t) \quad (2.24)$$

とおくと、式 (2.23) は r を分離定数として

$$\begin{aligned} dT(t)/dt &= -r T(t) \\ \nabla^2 B_m(x, y, z) &= -r \mu / \rho \cdot B_m(x, y, z) \end{aligned} \quad (2.25)$$

の2式に分離される。

導体の形状をあたえると、式 (2.25) は必要な境界条件を満足する固有値 r_m および固有関数 $B_m(x, y, z)$ に対して解をもつ。固有値はすべて正実であり、これらに対応する固有関数 $B_m(x, y, z)$ は完全直交系をなす⁽⁵⁵⁾から、初期条件として磁束分布が関数 $B_0(x, y, z)$ であたえられると、これを固有関数列 $\{B_m(x, y, z)\}$ によって

$$B_0(x, y, z, t) = \sum_m C_m B_m(x, y, z) \quad (2.26)$$

のように展開することができる。

したがって式 (2.23) の解として次式が得られる。

$$B_m(x, y, z, t) = \sum_m C_m B_m(x, y, z) \cdot \exp(-r_m t) \quad (2.27)$$

磁束密度の減衰の早さは、基本的には式 (2.27) の総和のうちで最も小さい r_m に対応してきまる。これを r_0 とすると、減衰時定数 τ は

$$\tau = 1 / r_0 \quad (2.28)$$

で定義することができる。

この時定数の大きさは式 (2.25) の第2式から見積ることができる。L を導体の大きさとする

$$\nabla^2 B \simeq B / L^2 \quad (2.29)$$

であるから

$$\tau \simeq \mu / \rho \cdot L^2 \quad (2.30)$$

と近似できる。

十分に薄い厚み C をもつ無限導体板を考え、この厚み方向に一樣な密度で導体を貫通している磁束が時間変化するときには、導体の大きさ $L = C$ として、近似的に

$$\tau \simeq \mu / \rho \cdot C^2 \quad (2.31)$$

が得られる。 $C = 35 \mu$ の銅板 ($\mu = \mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{H/m}$, $\rho = 1.7 \times 10^{-8} \Omega \text{m}$) では $\tau \simeq 90 \text{ns}$ となる。

以上の検討結果から、導体板上に配置された磁性薄膜が困難軸方向にスイッチされると、式(2.21)で示される \overline{H} を初期値とし式(2.30)で示される時定数をもって減衰する容易軸方向磁界があらわれることが明らかとなった。

2.2.4 非破壊読出し特性の検討

2.1.3で述べたような非破壊読出し動作特性を理論的に検討するために、まず容易軸方向微小磁界に対する磁性薄膜の書き込み、読出し特性について検討を行なう。

図2.20に示すように、異方性角度分散をもつ磁性薄膜に対して、その平均的な困難軸方向に異方性磁界 H_K よりも大きい外部磁界 H_T が、また平均的な容易軸方向に外部磁界 H_L が、それぞれ加えられているものとする。

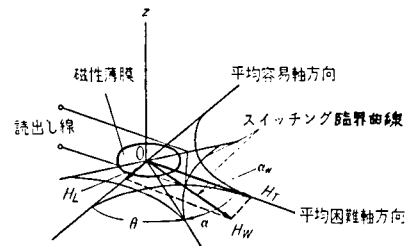


図 2.20 磁性薄膜の困難軸方向駆動

またこのとき、磁性薄膜の各微小部分の困難軸は、平均困難軸方向からの角度を α 、標準偏差を σ として、角度 $\alpha = 0$ のまわり

$$f(\alpha) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \cdot \exp\left(-\frac{1}{2(\alpha/\sigma)^2}\right) \quad (2.32)$$

なる確率密度で正規分布しているものとする。慣用されている異方性角度分散の測度 α_{80} と σ は、 $\alpha_{80} = 1.28\sigma$ で関係づけられる。

いま H_L を一定値に保ったまま H_T を減少させていくと、 H_T と H_L とのベクトル和の大きさ H_w が $H_w = H_K$ となったとき、 H_w が平均困難軸方向となす角度 α_w を境として、 $\alpha < \alpha_w$ なる部分の磁化は時計方向に、 $\alpha > \alpha_w$ なる部分の磁化は反時計方向にそれぞれ回転し、 $H_T = 0$ の状態では、容易軸方向に沿って図2.21の斜線で示す部分に相当する残留磁束 $\Delta\phi$ が得られる。したがって $\Delta\phi$ は飽和磁束量を ϕ_0 として

$$\Delta\phi/\phi_0 = \frac{2}{\sqrt{2\pi}} \int_0^{\alpha_w/\sigma} \exp(-\beta^2/2) d\beta \quad (2.32)$$

であらわすことができる。ただし $\beta \equiv \alpha/\sigma$ とした。また

$$\alpha_w = \sin^{-1}(H_L/H_K) \quad (2.33)$$

である。

したがって式(2.32)は

$$\Delta\phi/\phi_0 = F_1(\sigma, H_K, H_L) \quad (2.34)$$

と書くことができる。

また式(2.32)は、 H_L を加えるかわりに、磁性薄膜を駆動パルス磁界 H_w の印加方向から α_w だけ回転させたとき、 H_w が終了したあとの容易軸方向残留磁束としても考えることができる。このときには式(2.32)は

$$\Delta\phi/\phi_0 = F_2(\sigma, H_K, \alpha_w) \quad (2.35)$$

と書くことができる。

図2.22は容易軸方向磁界 H_L に対して $\Delta\phi/\phi_0$ をプロットした、式(2.32)の計算例であって、 H_K および σ をパラメータとした。

図2.22は、容易軸方向磁界 H_L で書込んだときの磁性薄膜の容易軸方向実効磁束量 $\Delta\phi$ を示している。

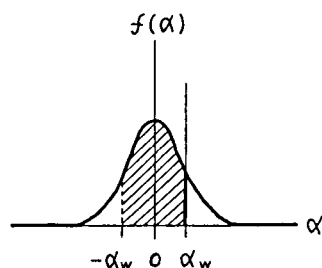


図 2.21 異方性角度分散の確率分布

つぎに容易軸方向磁束量が $\Delta\phi$ である磁性薄膜の困難軸方向に駆動磁界 H_w を加えて読出すると、影像磁極による容易軸方向磁界の時刻 t における値 $\overline{H}_0(t)$ として

$$\overline{H}_0(t) = \Delta\phi/\phi_0 \cdot \overline{H}_0 \cdot \exp(-t/\tau) \quad (2.36)$$

が得られる。ここで \overline{H}_0 は式(2.21)で、また τ は式(2.30)であたえられる。

図2.23に、 t/τ をパラメータとして、 $\Delta\phi/\phi_0$ に対する $\overline{H}_0(t)$ の計算値をプロットした。

図2.23は、容易軸方向実効磁束量 $\Delta\phi$ の磁性薄膜を読出したときに得られる容易軸方向磁界の時刻 t における値 $\overline{H}_0(t)$ を示している。

いま時刻 t において、容易軸方向バイアス磁界 H_d が外部から加えられているときには容易軸方向全磁界を $H_L(t)$ として

$$H_L(t) = \overline{H}_0(t) + H_d \quad (2.37)$$

となる。

したがって、磁性薄膜に連続して困難軸方向駆動パルスを加えて書込み、読出しを行なう定常状態では、式(2.32)と式(2.37)が同時に満足されなければならない。

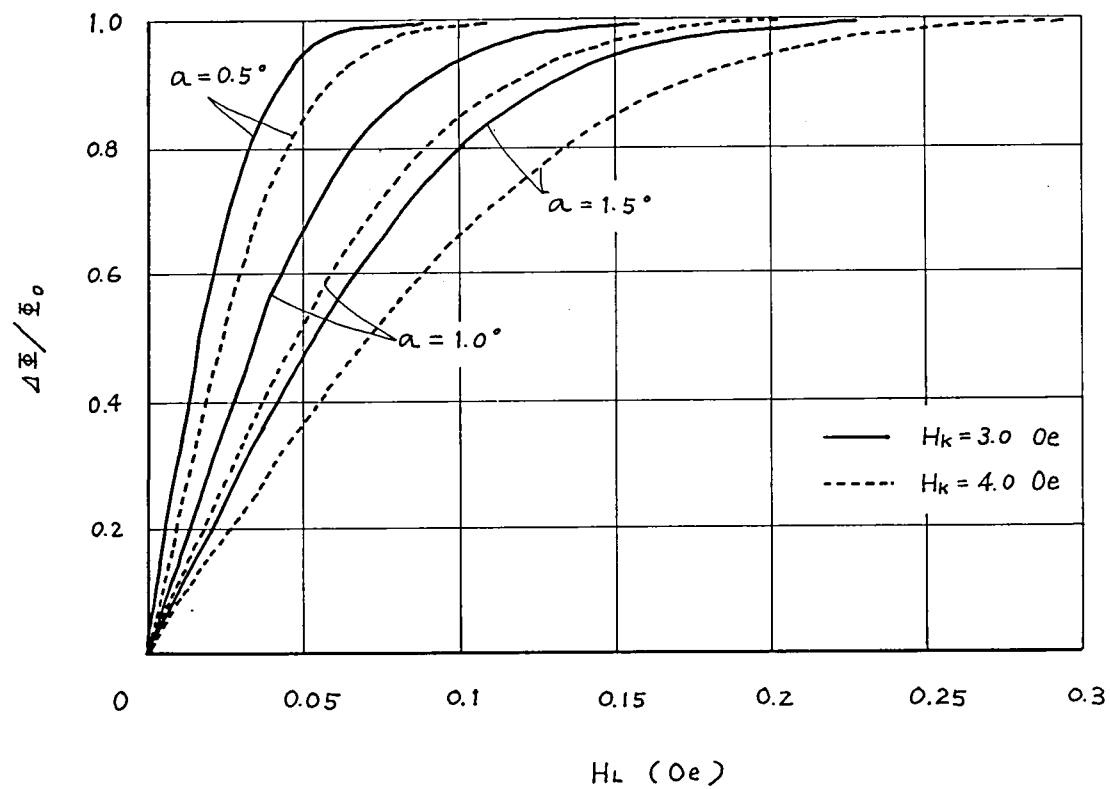


図 2.2.2 容易軸方向磁界 H_L で書込んだときの $\Delta\phi/\phi_0$

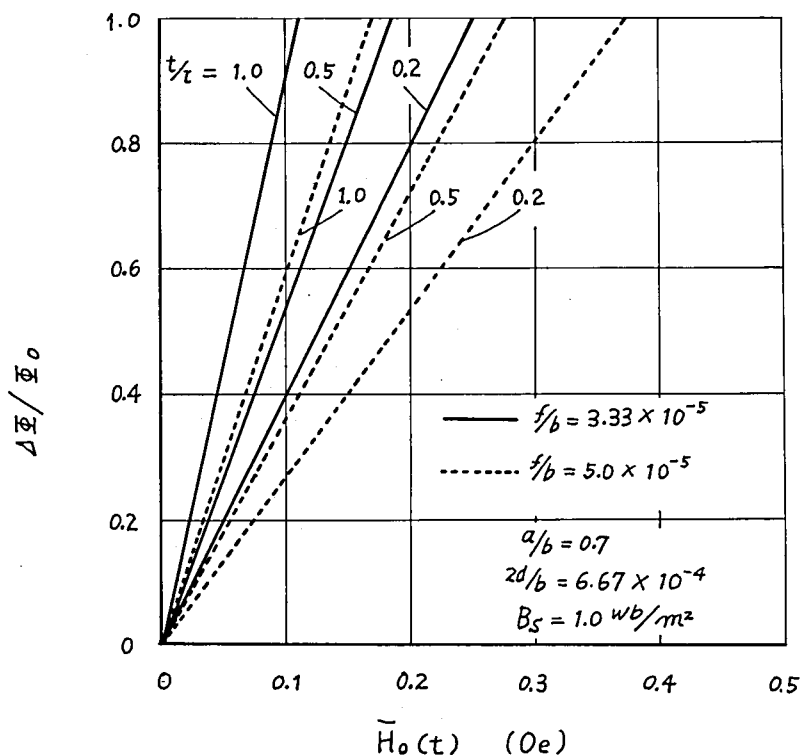


図 2.23 容易軸方向磁束 $\Delta \phi$ の読出しによって
つくられる容易軸方向磁界 \bar{H}_0 。

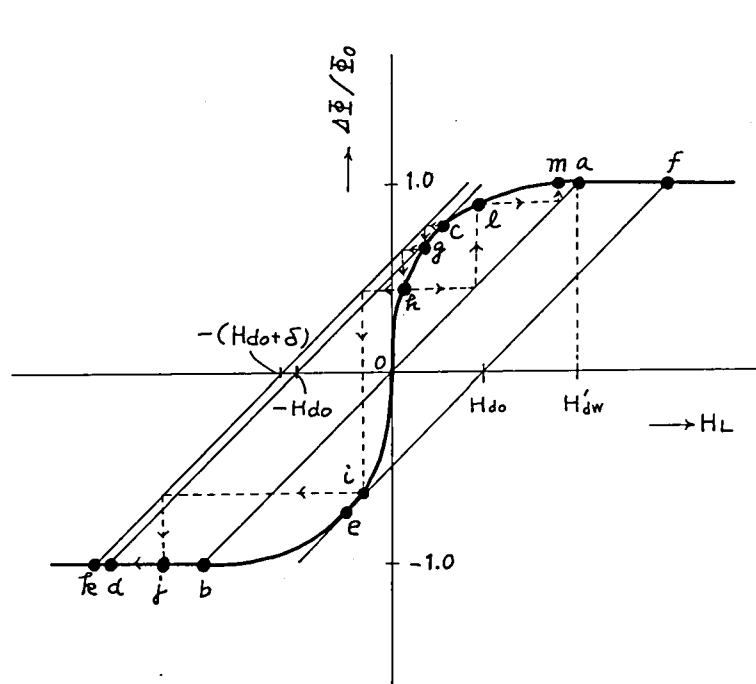
磁性薄膜からの読出し電圧 V_0 は

$$V_0 \propto -\partial(\Delta \phi) / \partial t \quad (2.38)$$

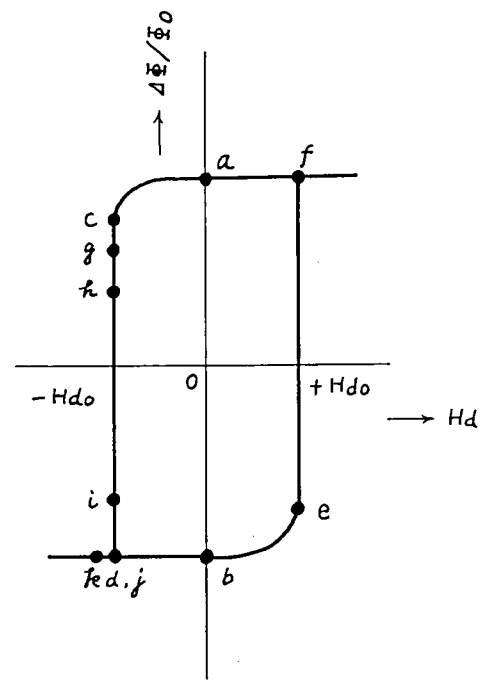
であり、駆動パルスの振幅および立上り時間を一定とすれば近似的に $V_0 \propto \Delta \phi$ であるから、 V_0 の容易軸方向バイアス磁界 H_d に対するヒステリシスループは、式(2.32)と式(2.37)を連立方程式として $\Delta \phi$ について解くことにより得られる。実用的には図 2.22 と図 2.23 を利用して図式的に解を得る方法が簡単である。

式(2.37)を念頭において、 H_d の正負の値について図 2.22 と図 2.23 を重ねあわせると図 2.24(a)が得られる。

$H_d = 0$ のときには、点 a と点 b の 2 つの安定点が存在する。動作点が a にあるとき、 H_d を負の方向に増していくと、安定点は点 c から点 d に移る。また動作点が点 b にあるとき、正の方向に H_d を増していくと、安定点は点 e から点 f に移る。このときの H_d の値を H_{d0} とする。このようにして得た、 H_d に対する $\Delta \phi / \phi_0$ をプロットすると、図 2.



(a)



(b)

図 2.2 4 ヒステリシス特性の説明

2.4(b)のヒステリシスループが得られる。

図 2.2.5 および図 2.2.6 に、容易軸方向バイアス磁界に対するヒステリシスループの計算例をプロットして示した。

磁性薄膜の寸法に関するパラメータは、 $a = 2 \text{ mm}$, $b = 3 \text{ mm}$, $f = 1000 \text{ \AA}$, $d = 10 \text{ \AA}$ と仮定して定めた。

こゝで図 2.2.4 (b)における点 c から d への移行,あるいは点 e から点 f への移行は,次のようにして完了する。

図 2.2.4 (a)において H_d が $-H_{d0}$ から $-(H_{d0} + \delta)$ に変化すると,第 1 発目の駆動パルスの前縁において誘起された容易軸方向磁界によって,同じパルスの後縁において点 g

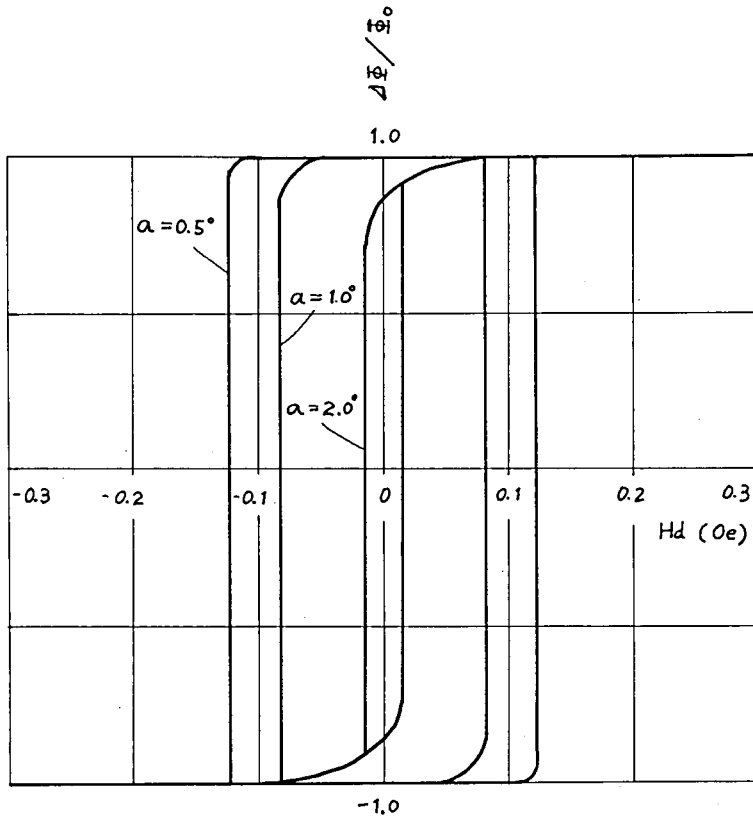


図 2.2.5 角度分散 σ をパラメータとするヒステリシス理論曲線。

$$a/b = 0.7, f/b = 3.33 \times 10^{-5}, 2d/b = 6.67 \times 10^{-4},$$

$$t/\tau = 0.5, H_K = 3 \text{ Oe}, B_s = 1 \text{ Wb/m}^2.$$

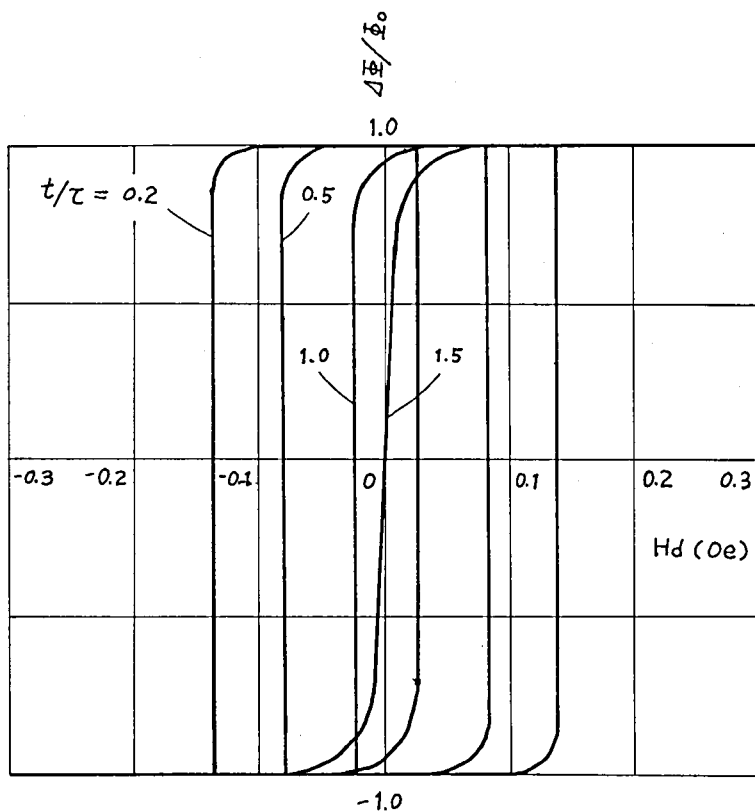


図 2.26 t/τ をパラメータとするヒステリシス理論曲線。

$$a/b = 0.7, f/b = 3.33 \times 10^{-5}, 2d/b = 6.67 \times 10^{-4},$$

$$H_x = 3.0 \text{ Oe}, \sigma = 1.0^\circ, B_s = 1 \text{ Wb/m}^2.$$

に相当する $\Delta\phi/\phi_0$ に書き込まれ、次に第 2 発目の駆動パルスによって同じようにして点 h に相当する $\Delta\phi/\phi_0$ に移り、以下点 h から点 i へと、順次移っていく。このようにして図 2.24(a)においては 4 発の駆動パルスで $\Delta\phi/\phi_0 = -1.0$ に相当する点 j に移行が完了する。

いま外部から容易軸方向磁界が加わって、点 h に相当する $\Delta\phi/\phi_0$ の状態にあるときこの外部磁界がとり去られたあとで駆動パルスが加えられると、点 e から点 l へ、点 l から点 m へと $\Delta\phi/\phi_0$ は次第に成長して正常動作点 a へと復帰する。

このことは、この非破壊読出し方式が帰還的に作用する自動回復機能をもっていて、きわめて安定な動作が得られることを示している。

動作点が点 a にあるとき、全磁束量を反転させて点 b に 1 回で書き込みを完了させるに必

図 2.27 から明らかなように

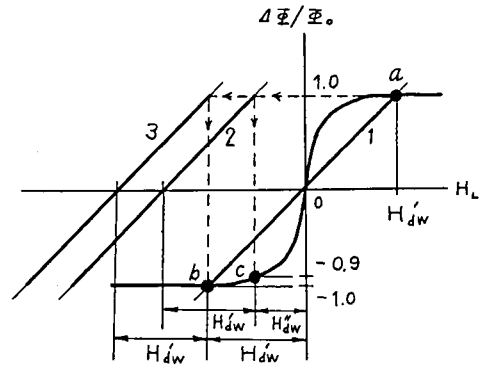
であたえられる。こゝで $H'dw$ は定常動作点における渦電流磁界を打消すに必要な容易軸方向磁界の大きさである。

において、 $\Delta\phi/\phi_0 = 0.9$ に対する角度分散 σ と異方性磁界 H_K とからきまる容易軸方向磁界としてあたえられる。

Hdw' は、また、図 2.7, 図 2.10 における、駆動パルス後縁に対するヒステリシスループの零交差点に対応する容易軸方向磁界として理解される。

$$H_{c_0} > H_{dw} \quad (2.43)$$

第2式は、全磁束量の90%をスイッチさせる1回書込みの条件である。



3 ; 100% 書込み。

図 2.2 4(a)からも明らかなように、一般に $H'dw' > Hd_0$ である。

第 3 式は、 $H'dw$ が磁性薄膜の磁壁クリープからきまる保磁力のしきい値 $H'c_0$ を越えないことであって、隣接ビットに補数情報が書込まれるときに注目ビットの記憶情報が破壊されない条件である。

これまでの検討結果から、 Hd_0 の大きさをきめる要素をまとめると次のようになる。

Hd_0 を大きくするには、

磁性薄膜について

- (1) 飽和磁束密度 B_s を大きくする。
- (2) 容易軸方向の長さに対する膜厚の比 f/b を大きくする。
- (3) 容易軸方向の長さに対する困難軸方向長さの比 a/b を大きくする。
- (4) 異方性角度分散 α_{80} を小さくする。
- (5) 異方性磁界 H_K を小さくする。

記憶細胞の構造について

- (6) 近傍導体の大きさ L (磁性薄膜に比べて充分大きい導体板では厚み c) を大きくする。
- (7) 磁性薄膜の容易軸方向長さに対する近傍導体と磁性薄膜との距離 d/b を小さくする。

駆動パルス波形について

- (8) パルス幅を短かくする。

などの手段をとればよい。

つぎに $H'dw$ の大きさをきめる要素は、 Hd_0 におけると同じであって、上記の(1)から(7)によって $H'dw$ は大きい値になる。

$H'dw$ については、 H_K が小さく、 α_{80} も小さいほど、小さくなる。

磁性薄膜について述べた、たとえば(1)から(5)までの条件は必ずしも両立しうる相互関係にはない。

すなわち、 f/b および a/b を大きくすると減磁力が大きくなって α_{80} が増加する⁽³¹⁾。また減磁力が保磁力に比べて無視できない大きさになると、静磁エネルギーを引下げるように磁性薄膜の両端に反磁区が生じ、容易軸方向残留磁束 $d\phi/\phi$ を減少させる。また一般に f が大になると保磁力は低下し⁽⁵⁵⁾⁽⁵⁶⁾、動作余裕度を減少させる。

2. 2. 5 本章の概要

磁性薄膜に加えられる困難軸方向駆動パルス磁界の終了期において作用する容易軸方向リセット磁界の大きさを理論的に求め、磁性薄膜の磁気特性があたえられたとき、読出し電圧のヒステリシスループの形状を定めうることを示した。

非破壊読出し特性が自動安定化作用をもっていることを明らかにし、理論的検討から結論される非破壊読出し記憶の動作余裕度と磁性薄膜の磁気特性、記憶細胞構造、駆動パルス波形との関連について論じた。

以上の検討により、非破壊読出し特性の基礎理論と設計指標を明らかにした。

2. 3 非破壊読出し特性の実験的検討

2. 3. 1 書き込み特性

駆動パルス後縁における応答電圧ヒステリシスループの零交さ点に相当する容易軸方向磁界は、2. 2. 4で述べたように、条件つき1回書き込みに必要なしきい磁界 H'_{dw} である。

$a = 4 \text{ mm}$, $b = 8 \text{ mm}$ ($a/b = 0.5$) および $a = 8 \text{ mm}$, $b = 8 \text{ mm}$ ($a/b = 1.0$) の形状をもつパーマロイ薄膜の厚み f に対する H'_{dw} の測定結果を図 2. 2 8 に示した。 a/b , f/b の推移に対する H'_{dw} の変化は理論と定性的に一致している。

図 2. 2 9 (b) は、同図 (a) に

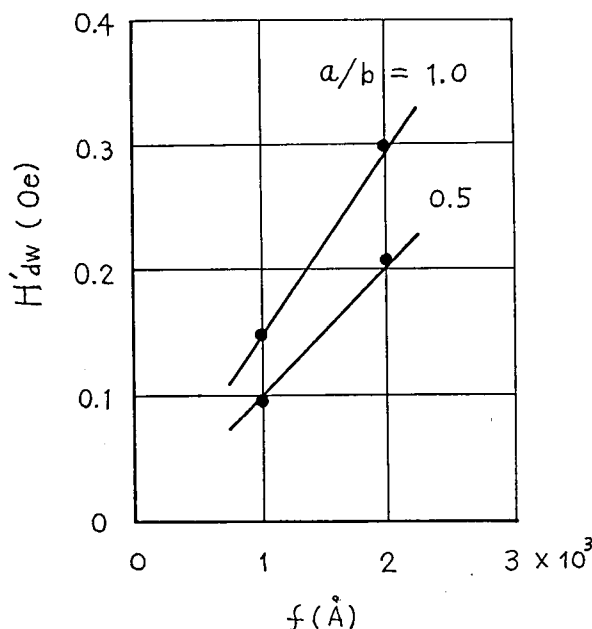
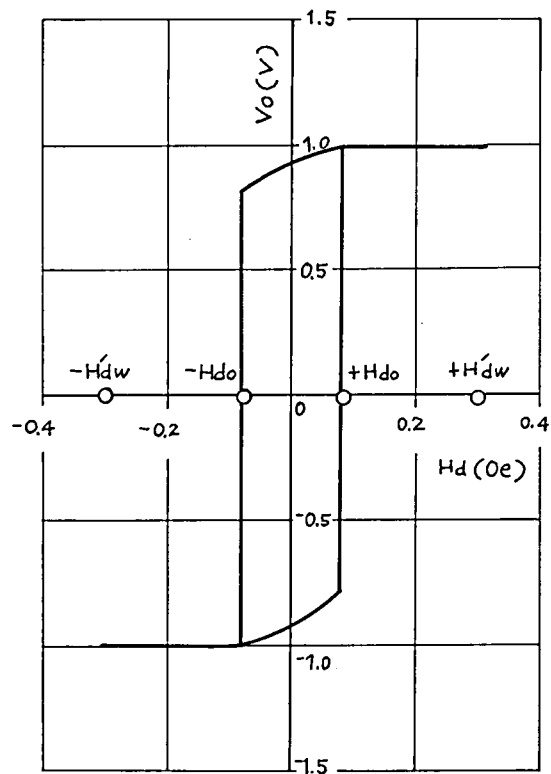


図 2. 2 8 膜厚 f に対する H'_{dw} の推移。

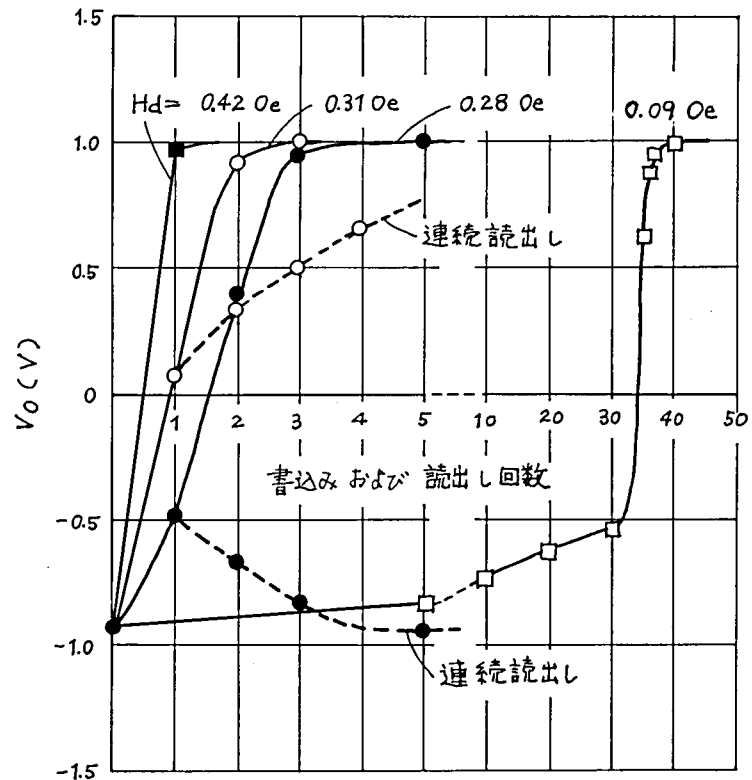
磁性薄膜； $H_K = 29 \text{ Oe}$, $b = 8 \text{ mm}$.

駆動パルス； $H_T = 1.5 H_K$, パルス幅 20 ns ,

駆動線構造；図 2. 9.



(a)



(b)

図 2.29 ヒステリシス特性(a)と書込み特性(b)。

$a = 8 \text{ mm}$, $b = 8 \text{ mm}$, $f = 2000 \text{ Å}$, $H_K = 2.9 \text{ Oe}$, $H_c = 0.8 \text{ Oe}$,

$\alpha_{80} = 2^\circ$, $H_T = 1.5 H_K$, パルス幅 20 ns , 駆動線構造 図 2.9。

示すヒステリシスループをもつ磁性薄膜に対する、容易軸方向外部磁界 H_d をパラメータとする書込み特性である。図 2.29(a) から、 $H_{d0}=0.080\text{Oe}$ 、 $H'dw=0.300\text{Oe}$ であることがわかる。

$H_{d0} < H_d = 0.090\text{Oe} < H'dw$ なる H_d では、30 回以上の連続書込みによってはじめて書込みが達成される。

$H_{d0} < H_d = 0.280\text{Oe} < H'dw$ なる H_d では、1 回書込みでは記憶情報が反転せず、2 回目の書込みではじめて記憶情報が反転する。1 回書込みで読出し電圧 V_0 が $\frac{1}{2}$ におちた状態で、 H_d をとり去って連続読出しを行うと、点線で示すように、最初の読出し電圧レベルに回復してしまう。

$H'dw < H_d = 0.310\text{Oe}$ なる H_d では、1 回書込みで飽和振幅の 10% 程度の読出し電圧レベルまで書込まれる。2 回目の書込みでは約 90% の書込みが達成される。1 回書込み後 H_d をとり去って連続読出しを行うと、点線で示すように読出し電圧は次第に成長して、自動的に 100% 書込みが完了する。

$(H'dw + H''dw) < H_d = 0.40\text{Oe}$ なる H_d では、1 回書込みで 95% 以上の書込みが完了する。

以上の実験結果は、2.2.4 で述べた理論的考察と一致している。

2.3.2 非破壊読出し特性

実験に用いた磁性薄膜試料の特性値を表 2.1 に、また単位記憶細胞の構造を図 2.30 に示した。読出し線の負荷抵抗は 50Ω である。容易軸方向バイアス磁界はヘルムホルツ・コイルによってあたえた。地磁気の打消しにも他のヘルムホルツ・コイルを使用した。

表 2.1 磁性薄膜試料の特性

記 号	厚 み f (Å)	8 mm ϕ サンプルによる磁気特性		
		H_K (Oe)	H_c (Oe)	α_{80}
A	500	2.6	2.3	$1^\circ 31'$
B	1000	3.5	1.6	$59'$
C	1100	3.0	2.0	$1^\circ 42'$

50Hz ループトレーサーによる。80% Ni - 20% Fe
パーマロイ蒸着膜。0.2mm 厚ガラス基板。

読出し電圧のヒステリシスループは、せん頭値をサンプリングして保持回路に入れ、X-Y記録計で自動記録させた。

図 2.3 1 および図 2.3 2 は、図 2.3 0 (A) の細胞構造において、膜厚がほぼ等しく異方性角度分散の異なる磁性薄膜の読出し電圧ヒステリシスループが、駆動パルス幅 t_w に対して変化する様子を示したものである。

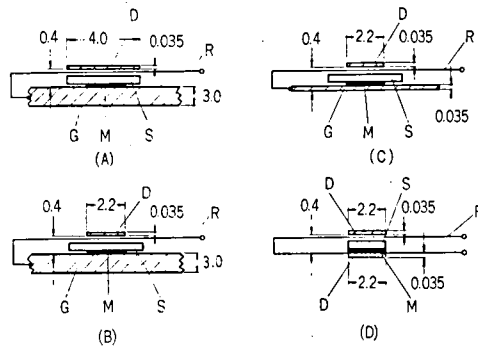


図 2.3 0 単位記憶細胞の困難軸方向断面図。

磁性薄膜 M, 0.2 mm 厚ガラス基板 S,
接地銅板 G, 駆動線 D, 0.05 mm ϕ
読出し線 R, 単位 mm。

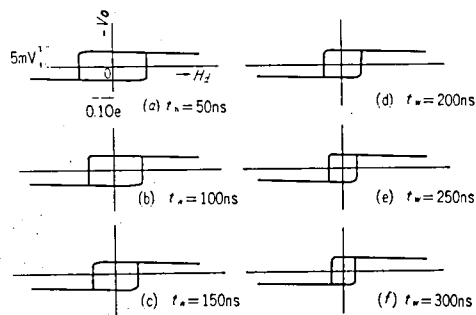


図 2.3 1 読出し電圧ヒステリシスループ ($f = 1000 \text{ Å}$, $\alpha_{80} = 59^\circ$).

細胞構造; 図 2.3 0 (A), $H_T = 1.5 \text{ Hk}$ ($t_T = 20 \text{ ns}$),
磁性薄膜; 表 2.1 (B), $a = 2 \text{ mm}$, $b = 3 \text{ mm}$.

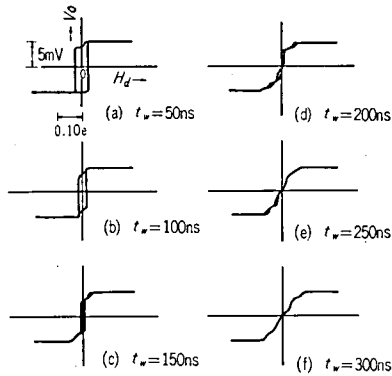


図 2.3.2 読出し電圧ヒステリシスループ ($f = 110 \text{ Oe}$, $\alpha_{80} = 1^\circ 42'$).

細胞構造；図 2.3.0 (A), $H\tau = 1.5 \text{ Hk}$ ($t_r = 20 \text{ ns}$),

磁性薄膜；表 2.1 (C), $a = 2 \text{ mm}$, $b = 3 \text{ mm}$.

いま図 2.2.2 と図 2.2.3 とから、時刻 t/τ に対する H_{d0} の推移を求めると、図 2.3.3 が得られる。すなわち、異方性角度分散が小さく、 $t/\tau \ll 1$ なるときには、駆動パルス幅 t_w に対して H_{d0} を片対数方眼紙上にプロットすることにより、近似的に渦電流磁界の減衰時定数 τ を求めることができる。

図 2.3.4 は、図 2.3.1 と図 2.3.2 に一例を示した異方性角度分散の異なる磁性薄膜の、図 2.3.0 (A) の細胞構造における H_{d0} 減衰曲線であって、減衰時定数 τ は約 230 ns である。

後述するデータ（図 2.4.0）から、磁性薄膜のスイッチング時間を 50 ns として、渦電流が表面電流密度の 10% になる表皮の深さ（約 54μ ）をもって導体板の実効的な厚み C_{eff} とすると、式（2.3.1）から $\tau = 210 \text{ ns}$ が得られ、図 2.3.4 から得られる τ とほぼ一致する。

図 2.3.5 は、厚み 35μ の銅箔を導体基板とした図 2.3.0 (C) の細胞構造における H_{d0} の減衰曲線である。このとき $\tau \approx 75 \text{ ns}$ であり、2.2.3 で計算した $\tau = 90 \text{ ns}$ とほぼ一致する。

図 2.3.5 では、また、磁性薄膜と導体基板の間にそれぞれ厚み 5μ および 50μ のポリエチレン・テレフタレート・フィルムをはさんで距離 d を変化させたときの様子を示した。

図 2.3.6 は、図 2.3.0 (D) の細胞構造における読出し電圧のヒステリシスループであってこのように金属導体の広がり限定すると H_{d0} はいちじるしく小さくなる。

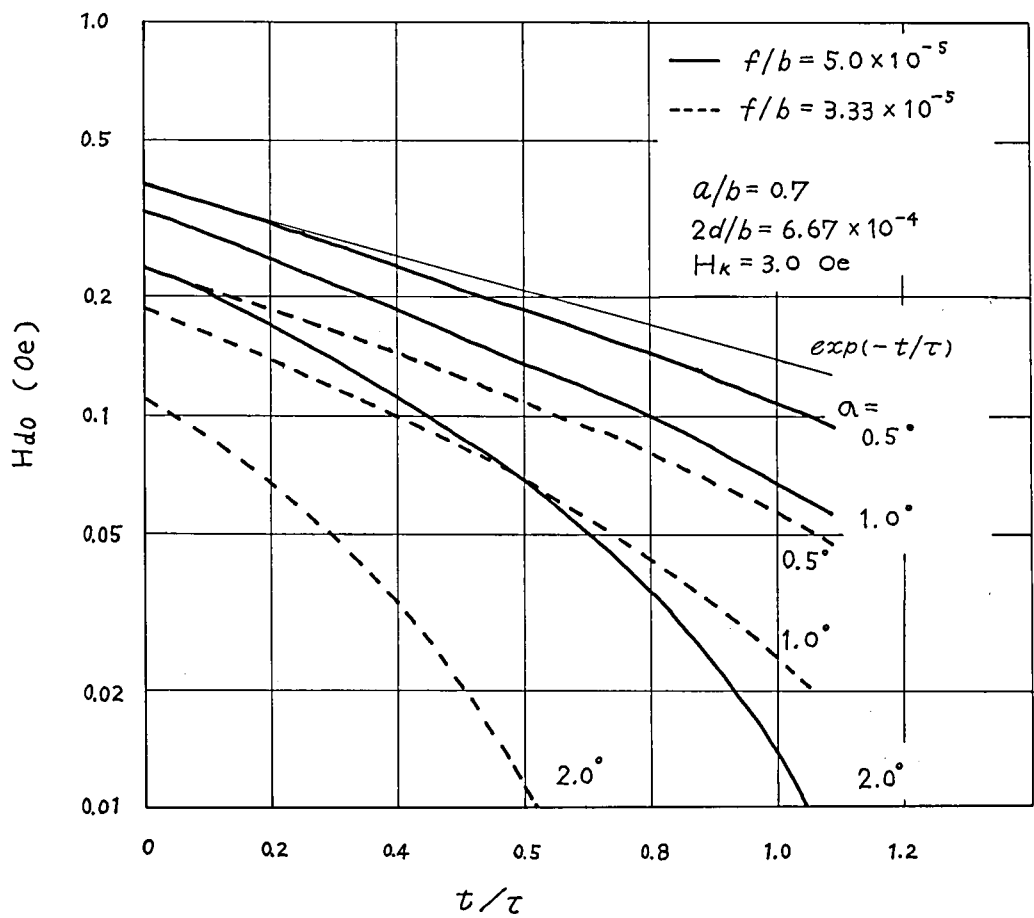


図 2.33 t/τ に対する H_{d0} の理論値

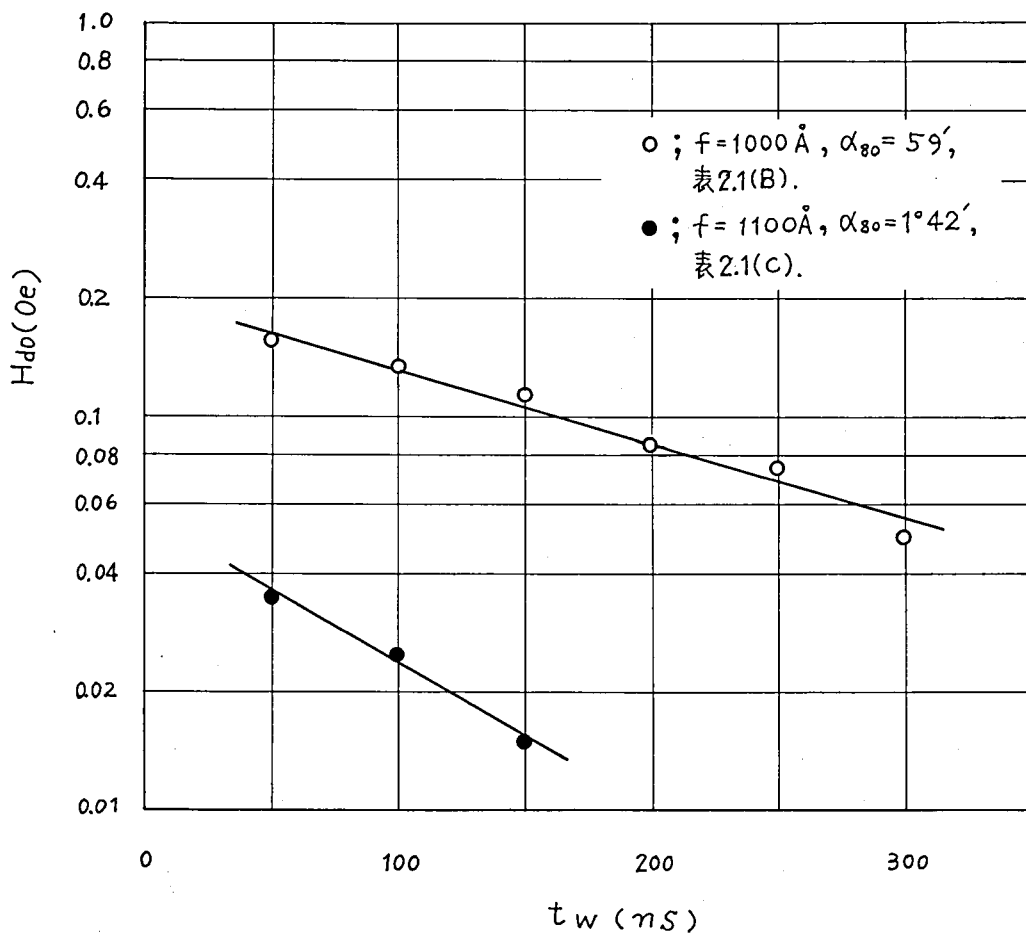


図 2.3.4 H_{d0} の減衰曲線。

細胞構造；図 2.3.1 (A), $H_r = 2 H_K$ ($t_r = 20 \text{ ns}$),

磁性薄膜； $a = 2 \text{ mm}$, $b = 3 \text{ mm}$.

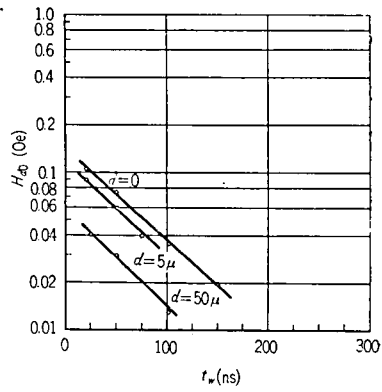


図 2.3.5 H_{d0} の減衰曲線。

細胞構造；図 2.3.1 (C), $H_T = 2 H_K$ ($t_r = 20 \text{ ns}$),
磁性薄膜；表 2.1 (B), $a = 2 \text{ mm}$, $b = 3 \text{ mm}$.

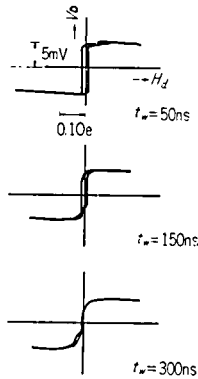


図 2.3.6 細胞構造(D)におけるヒステリシスループ。

$H_T = 2 H_K$ ($t_r = 20 \text{ ns}$), 磁性薄膜；
表 2.1 (B), $a = 2 \text{ mm}$, $b = 3 \text{ mm}$.

a/b および f/b の異なる磁性薄膜における H_{d0} の減衰曲線を図 2.37 に示した。 $f = 1000 \text{ \AA}$ でこの程度の寸法になると、 a/b および f/b の増加による減磁力のために異方性角度分散の増加、 $\Delta\phi/\phi_0$ の低下が支配的となり、 H_{d0} の初期値が小さくなることとがわかる。

図 2.38 および図 2.39 は、種々の駆動条件に対する読出し電圧波形の変化である。また図 2.40 に、駆動条件の変化に対する t_d , t_p , t_s , V_0 の推移を示した。ここで、駆動電流の 10% 立上り点を基準時点として読出し電圧の 10% 立上り時点までを遅れ時間 t_d , ピーク点までをピーキング時間 t_p , 10% 立下り点までをスイッチング時間 t_s とそれぞれ定義した。

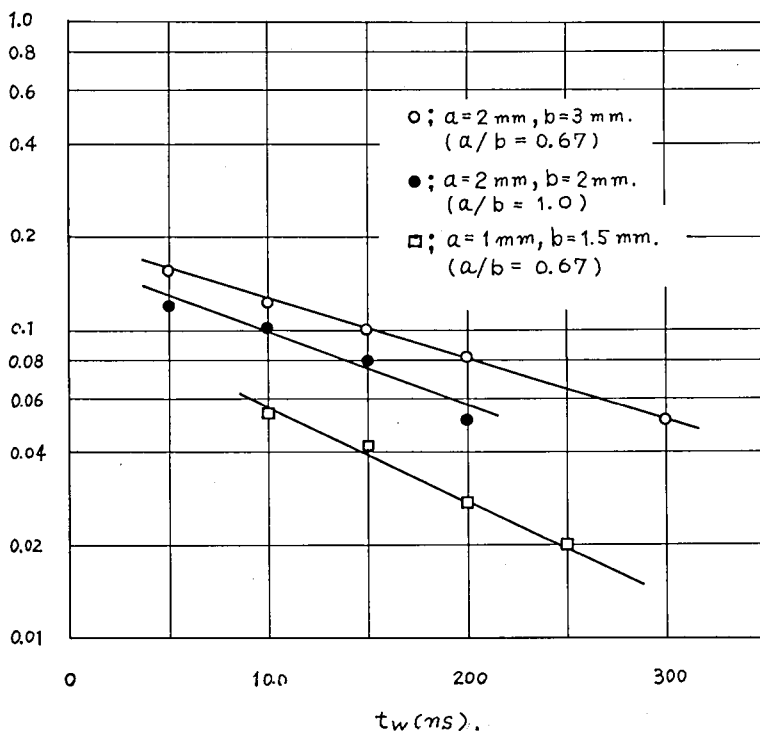


図 2.37 a/b , f/b の異なる磁性薄膜の H_{d0} 減衰曲線。
磁性薄膜；表 2.1 (b), 細胞構造；図 2.31 (A),
 $H_T = 1.5 H_K$ ($t_r = 20 \text{ ns}$)。

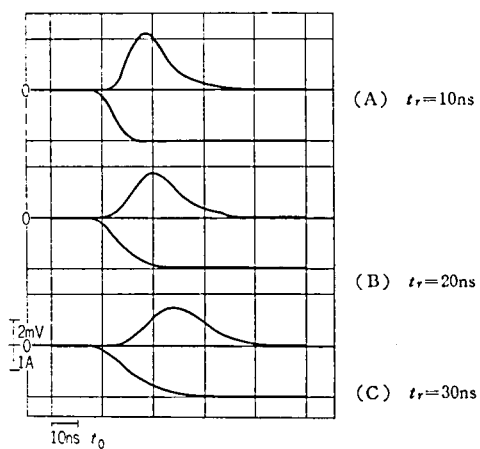


図 2.3.8 駆動電流の立上り時間 t_r に対する読出し電圧波形の変化（上側が読出し電圧 V_o ，下側が駆動電流 I_w ）。磁性薄膜；表 2.1 (B)， $a = 2 \text{ mm}$ ， $b = 3 \text{ mm}$ ，細胞構造；図 2.3.1 (A)， $H_T = 1.5 \text{ Hk}$ 。

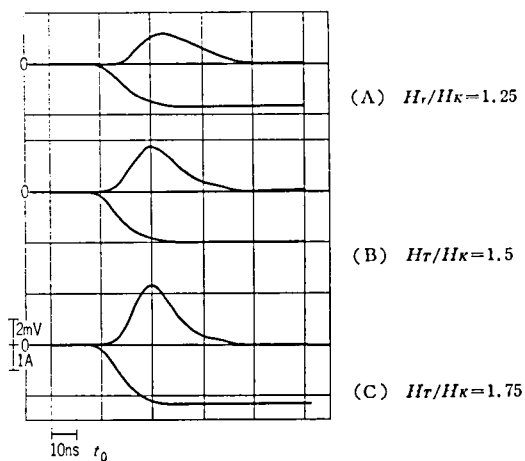


図 2.3.9 駆動電流の振幅変化に対する読出し電圧波形の変化（上側が読出し電圧 V_o ，下側が駆動電流 I_w ）。磁性薄膜；表 2.1 (B)， $a = 2 \text{ mm}$ ， $b = 3 \text{ mm}$ ，細胞構造；図 2.3.1 (A)， $t_r = 20 \text{ ns}$ 。

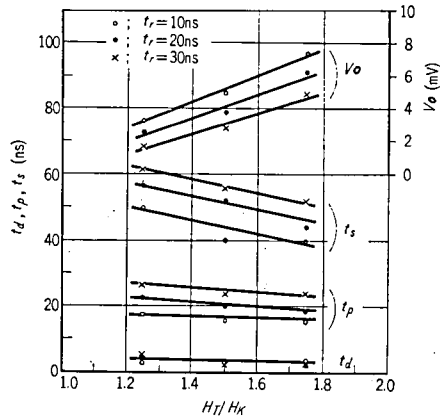


図 2.40 駆動条件に対する読出し電圧波形
の変化。

細胞構造；図 2.3 1 (B),

磁性薄膜；表 2.1 (B),

$a = 2 \text{ mm}$, $b = 3 \text{ mm}$ 。

磁性薄膜に近接して大きい導体があると、渦電流損失によって磁性薄膜のスウィッチングに制動が加わることが予想されるが、図 2.40 において磁性薄膜を導体面から 0.2 mm 隔してもほぼ同一のデータが得られ、スウィッチング時間 t_s などにも差は認められなかったもので、寄与は小さいと考えられる。

図 2.4 1 に膜厚の異なる磁性薄膜の駆動条件の変化に対する読出し電圧レベルの推移を示す。膜厚の変化に対して読出しレベルが線形関係にないのは、減磁力による実効駆動磁界の低下および反磁区のための有効磁束量の減少によるものと推定される。

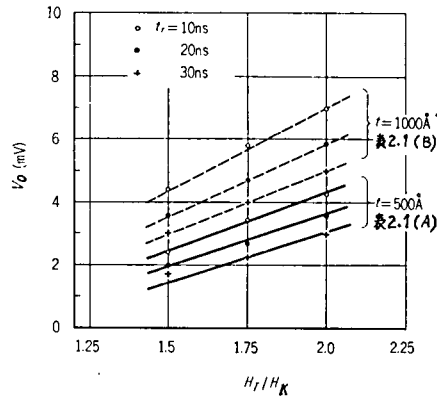


図 2.4.1 膜厚 f をパラメータとする駆動条件の変化
に対する読出し電圧のレベルの推移。
細胞構造；図 2.3.1 (A)，磁性薄膜；
 $a = 2 \text{ mm}$ ， $b = 3 \text{ mm}$ 。

2. 3. 3 本章の概要

書込み特性および読出し特性について実験的検討を行ない， a/b および f/b の変化に対する $H_d w$ の推移， 1 回書込み特性， 記憶情報保持に対する自動安定化作用などが，

2.2.4 で述べた理論と一致することを明らかにした。

さらに各種の記憶細胞構造に対して読出し特性を検討し， 渦電流磁界の減衰時定数が 2.

2.3 と述べた理論から得られる数値とほぼ一致することを明らかにした。

また駆動パルス磁界の振幅， 立上り時間などに対して， 読出し電圧レベル， 波形などを測定し， 記憶平面設計に必要な基礎データを得た。

2. 4 非破壊読出し記憶平面の特性

2. 4. 1 記憶平面の設計

マトリクス規模で非破壊読出し記憶としての基本特性を確認する目的で， 実験的に 7×7 スポットの記憶平面を試作した。

2.3 で得られた基礎データから， 磁性薄膜として膜厚 1000 Å 前後， $a = 2 \text{ mm}$ ， $b = 3$

mmの長方形スポットを用いることにした。実装した磁性薄膜は $60 \times 60 \times 0.2$ mmのガラス基板上に蒸着した 80%Ni - 20%Fe パーマロイであって、膜厚の実測値は 980 \AA である。8 mm ϕ の同時に蒸着した試料による磁気特性測定値は、 $H_K = 3.5 \text{ Oe}$, $H_C = 2.0 \text{ Oe}$, $\alpha_{80} = 1^\circ 17'$ であった。各スポットの配列ピッチは容易軸方向、困難軸方向とも 8 mmとしたが、端子処理の便宜上定めたもので、記憶密度の限界を示すものではない。

渦電流磁界の減衰時定数 τ は、2.3.2における検討結果から、75 ns 程度をとることにして、35 μ 厚みの片面銅箔エポキシガラス積層板を接地導体板として使用することにした。

図 2.4 2 に駆動線、情報線、読出し線など記憶布線の配置図を、また図 2.4 3 に記憶布

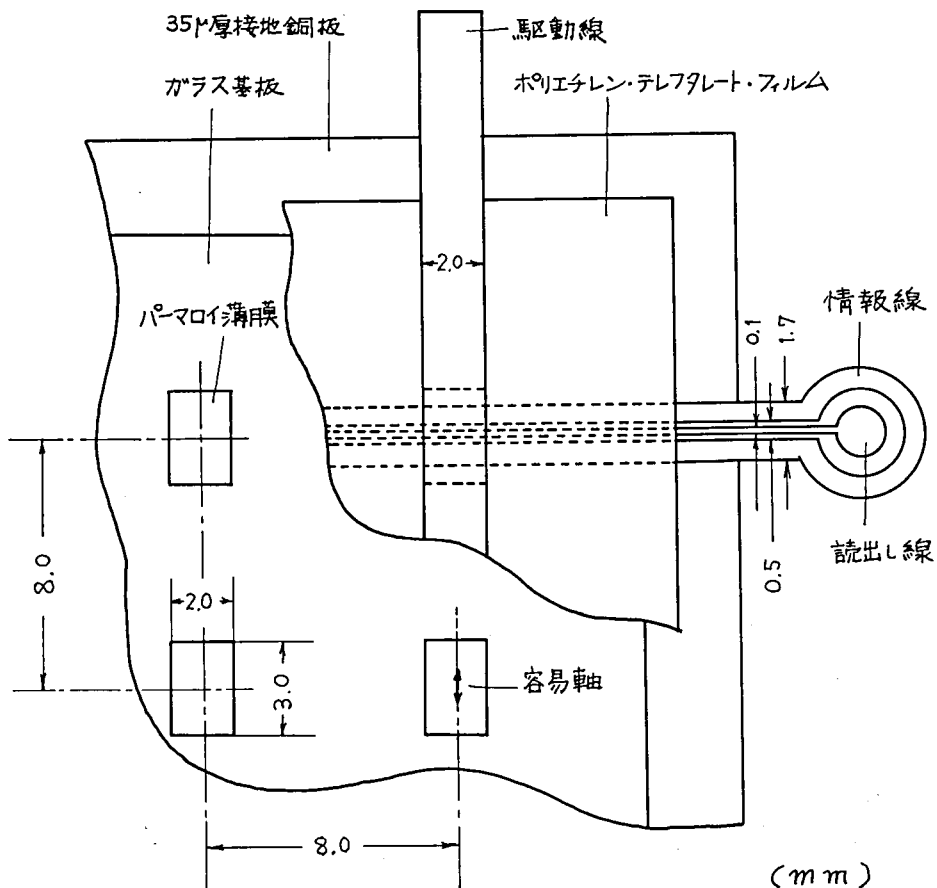


図 2.4 2 記憶布線の配置

線の容易軸方向断面図を示した。

駆動線はパルス電流 I_w によって困難軸方向駆動磁界を発生し情報線はパルス電流 I_d によって容易軸方向に正または負の情報磁界を発生する。情報線は磁性薄膜の全面にわたって比較的均一な磁界を供給する目的で、読出し線をはさんで2本に分割した布線を並列に配置した。

図 2.4.4 に示すストリップ線路において、厚み t は無視できる程度に薄く、電流密度 i は一様であるとして、任意の点 $P(x, y)$ における磁界は無限長線電流のつくる磁界を積分することにより求められる。

磁界の x 軸成分 $H_x(x, y)$

は

$$H_x(x, y) = \frac{i}{2\pi} \left[\tan^{-1}(1-X) \frac{S}{2Y} + \tan^{-1}(1+X) \frac{S}{2Y} + \tan^{-1}(1-X) \frac{S}{2(2-Y)} + \tan^{-1}(1+X) \frac{S}{2(2-Y)} \right] \quad (2.44)$$

である。ここで $X = 2x/w$, $Y = y/h$, $S = w/h$ とした。(2.44)式は磁性薄膜の寄与を無視した第1近似として適用される。

図 2.4.5 および図 2.4.6 は、図 2.4.3 の寸法に対する駆動線および情報線のつくる $H_x(x, y=h)$ の分布曲線である。

駆動線のつくる磁界 $H_x(0, y=h)/I_w$ は 4.8 Oe/A で、 $H_K = 3.5 \text{ Oe}$ の磁性薄膜に対して $1.4 H_K$ の困難軸方向磁界を供給する。

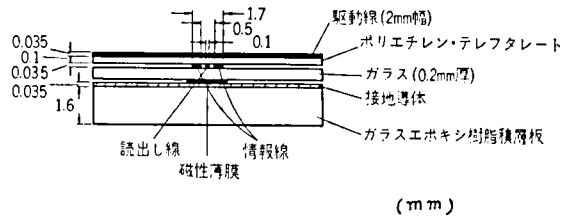


図 2.4.3 記憶布線の容易軸方向断面

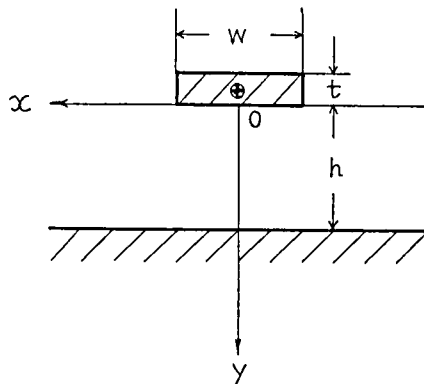


図 2.4.4 ストリップ線路

情報線のつくる磁界は双峯性であり、ピークにおいて $14.4 \text{ Oe}/\text{Å}$ 、中央部の谷において $7.1 \text{ Oe}/\text{Å}$ である。磁性薄膜の全面に一樣磁界を供給する点からは好ましくないが、駆動磁界に対する遮蔽効果を避ける意味もあって、後に述べるように必要な動作余裕度を得る点で支障がないことが予備実験の結果からも明らかとなったので、この構造寸法を採用することとした。

記憶特性の測定は、駆動線と読出し線間の結合静電容量を介して入ってくる読出し時点における雑音を消去するために、図 2.4.7 に示すように 2 スポットを 1 ビットとして用い読出し雑音を同相信号として差動変成器により除去する構成とした。したがって記憶平面は 7 語 / 3 ビット、計 21 ビット構成となる。また読出し電圧レベルは 1 スポット / ビットの場合よりも倍加する。差動変成器の同相信号除比は 50 MHz において 40 dB 以上ある。

図 2.4.8 にパーマロイ薄膜を蒸着したガラス基板と、記憶布線をエッチングした両面銅箔ポリエチレン・テレフタレート印刷配線シートを示した。図 2.4.9 は試作記憶平面の外観である。

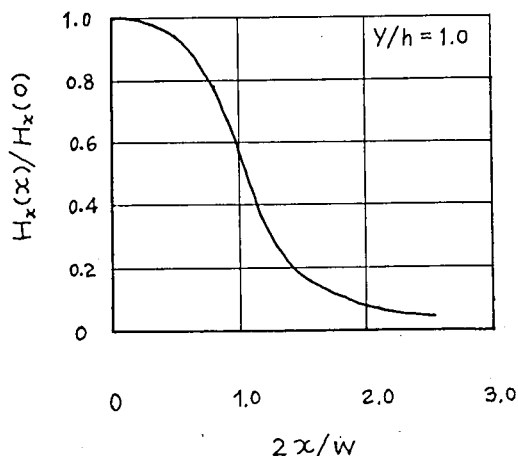


図 2.4.5 駆動磁界分布の計算値

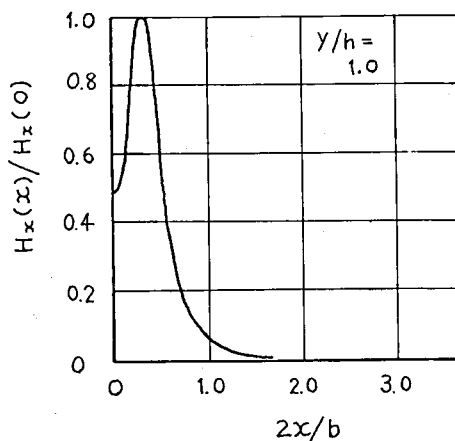


図 2.4.6 情報磁界分布の計算値、
b は磁性薄膜の容易軸
方向長さ

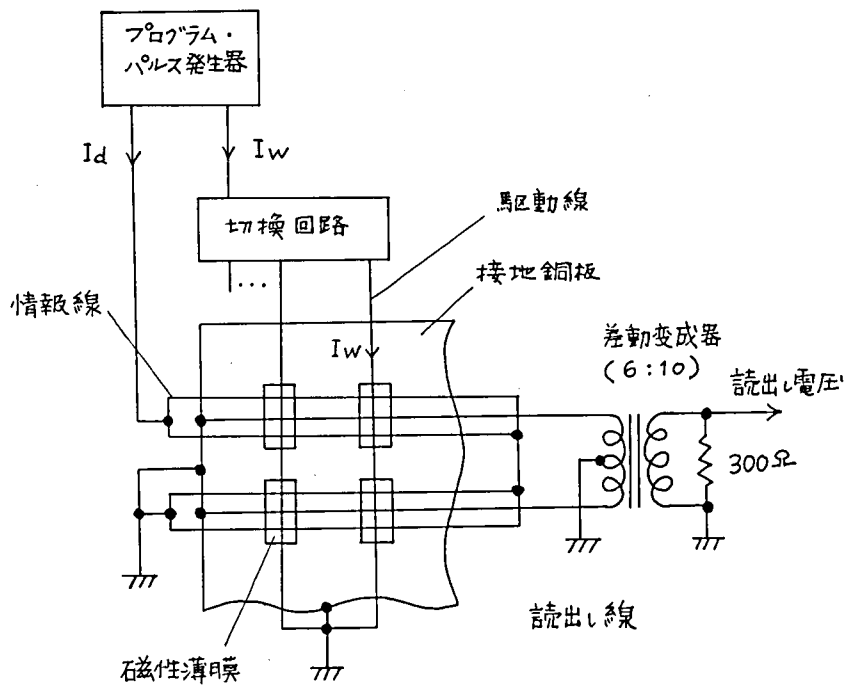


図 2.4.7 回路構成

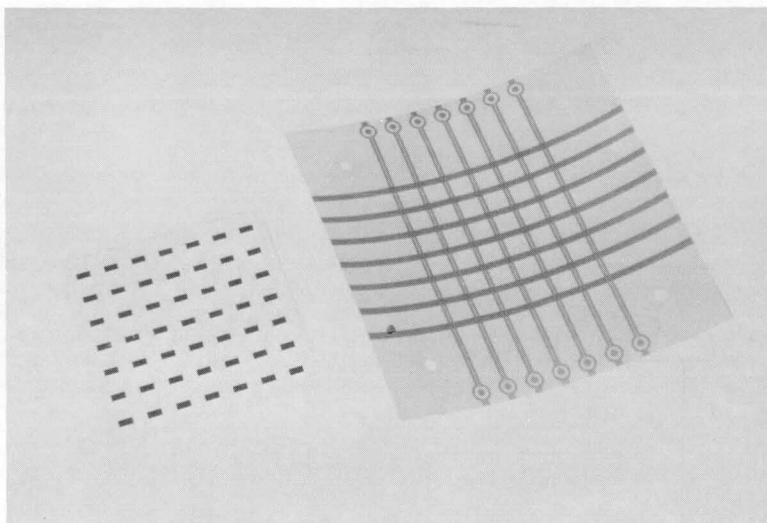


図 2.48 パーマロイ薄膜蒸着基板と
印刷配線による記憶布線

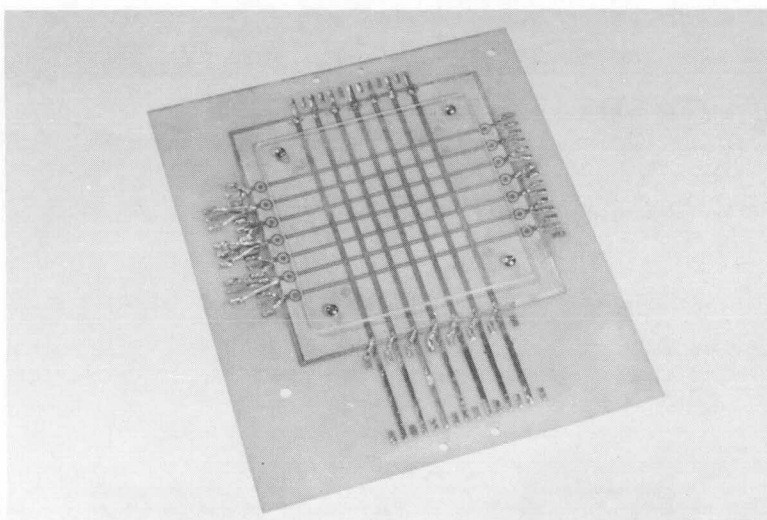


図 2.49 試作記憶平面

2. 4. 2 記憶平面の動作特性

試作した記憶平面の実験的検討に用いた測定パルス波形を図 2.5 0 に、また測定パルス系列を図 2.5 1 に示す。

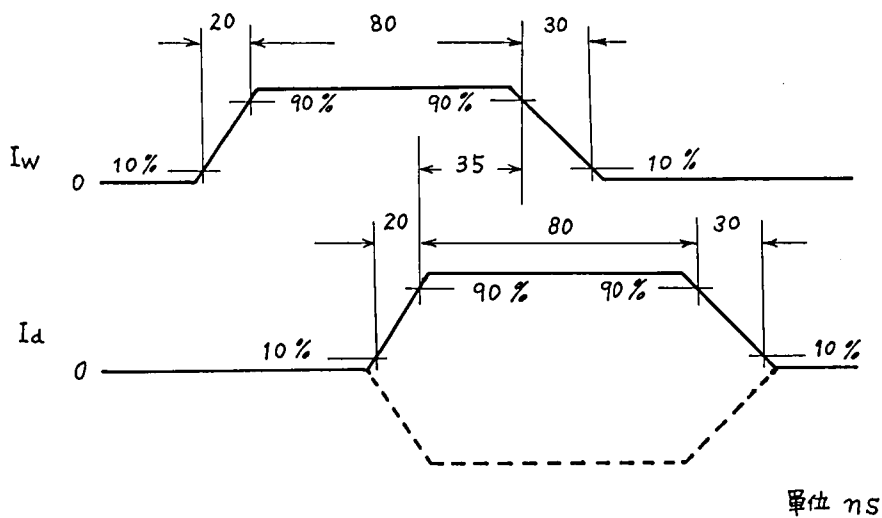


図 2.5 0 測定パルス波形

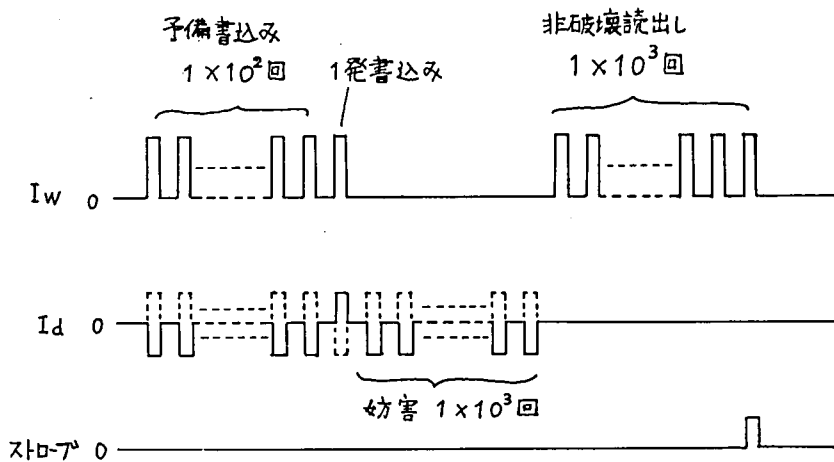


図 2.5 1 測定パルス系列

使用したプログラム・パルス発生器の性能上の制限から、駆動電流振幅 $I_w = 1.0 \text{ A}$, 立上り時間 $t_r = 20 \text{ ns}$ とした。また図 2.5 1 の測定パルス系列において、補数情報の予備書込後に 1 回書込みをしてただちに読出した場合の読出し電圧を無妨害読出し電圧、情報電流妨害と読出し妨害を加えてからの読出し電圧を妨害読出し電圧とした。読出し電圧波形の一例を図 2.5 2 に示す。約 20 dB の信号対雑音比が得られた。読出し電圧が 2.3. 2 におけるよりも大きいのは読出し線の近接配置によってスイッチング磁束との鎖交効率が改善されているためである。

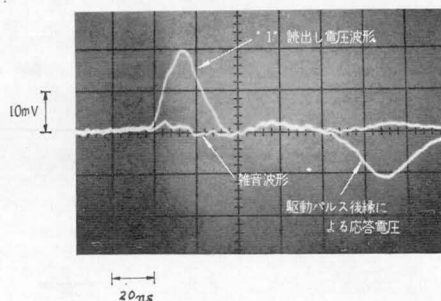


図 2.5 2 非破壊読出し電圧波形
($I_w = 1.0 \text{ A}$, $t_r = 20 \text{ ns}$)

記憶平面内の主要ビットにおける、情報電流振幅 I_d に対する読出し電圧特性を図 2.5 3 に示す。不良ビットを除いて、 I_d の動作範囲は $200 \text{ mA} \pm 50 \text{ mA}$ であった。

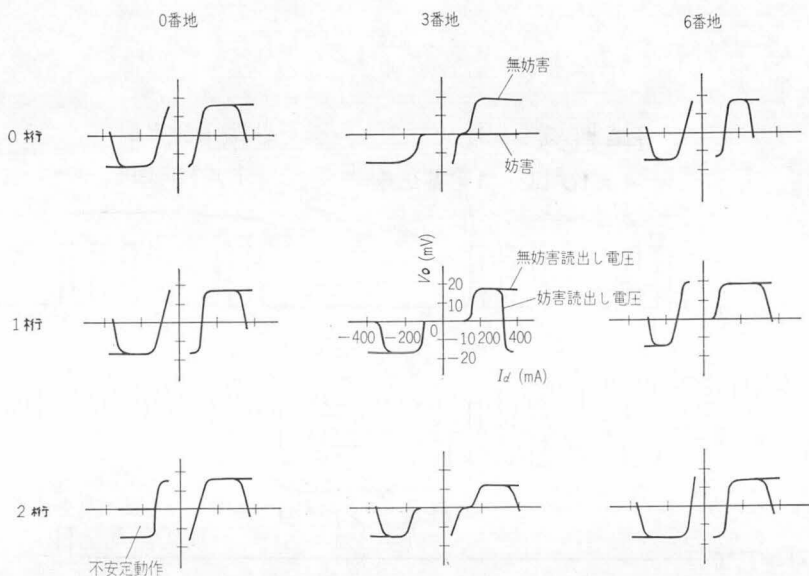
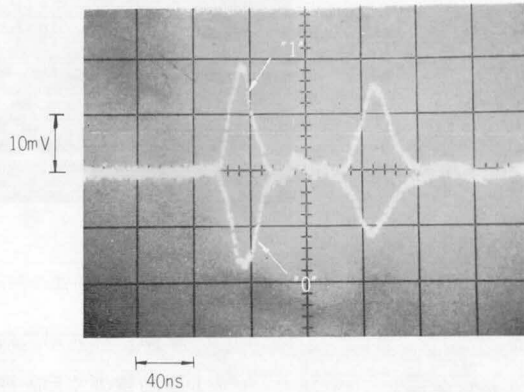
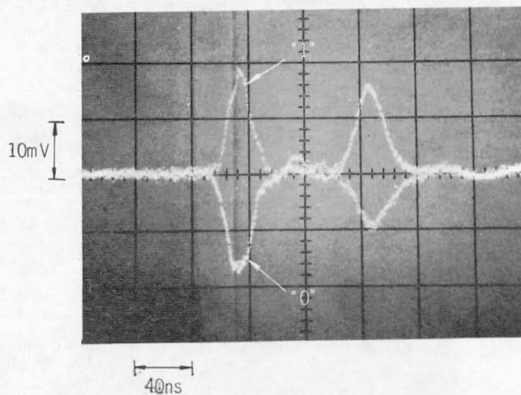


図 2.5 3 主要ビットにおける非破壊読出し電圧特性
($I_w = 1.0 \text{ A}$, $t_r = 20 \text{ ns}$)

非破壊読出し動作の長時間安定性を確認する目的で、 1×10^8 回の連続的な非破壊読出し実験を行なった。図 2.5.4 にその結果を示す。読出し電圧波形にはほとんど変化が認められず、長時間読出しに対する安定性が確認された。



(a) 1 回書き込み後の読出し電圧波形



(b) (a)にひきつづき 1×10^8 回連続読出し後の読出し電圧波形

図 2.5.4 非破壊読出しの長時間安定性

図 2.5 5 は、駆動電流パルス幅 t_w の変化に対する非破壊読出し動作余裕度を示す写真である。図から明らかなように、パルス幅 120 ns で誤動作ははじめ 130 ns 以上では動作しなくなる。測定は図 2.5 1 のパルス系列によって実施した。駆動パルス電流の平坦部がなくなった三角波に近い波形からはじまって、少くともパルス幅 100 ns まで、安定動作が得られることを確認した。

図 2.5 5 における最初の波形から明らかなように、 $t_r=20\text{ ns}$, $t_f=30\text{ ns}$, $t_w \simeq 10\text{ ns}$ の駆動

パルスでは、 60 ns のサイクル時間で連続読出しが可能である。

サイクル時間のいっそうの短縮をはかるために、 $t_r=7\text{ ns}$, $t_f=10\text{ ns}$, $t_w=10\text{ ns}$ の駆動パルスを準備して、図 2.5 6 に示すように、 40 ns の読出しサイクル時間が得られた。

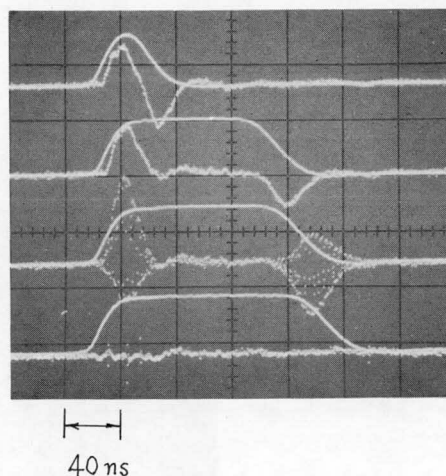


図 2.5 5 駆動パルス幅に対する動作余裕度
(駆動電流波形と読出し電圧波形を重ねあわせて示した)

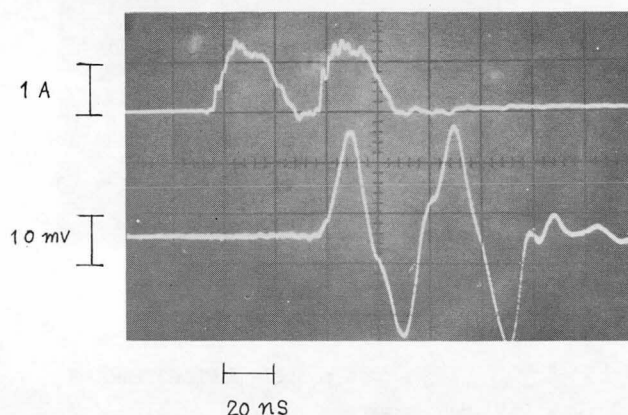
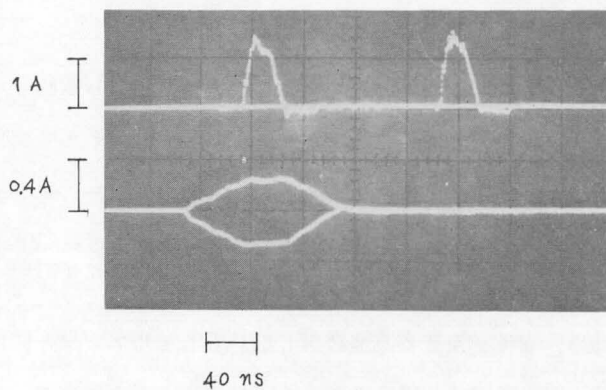
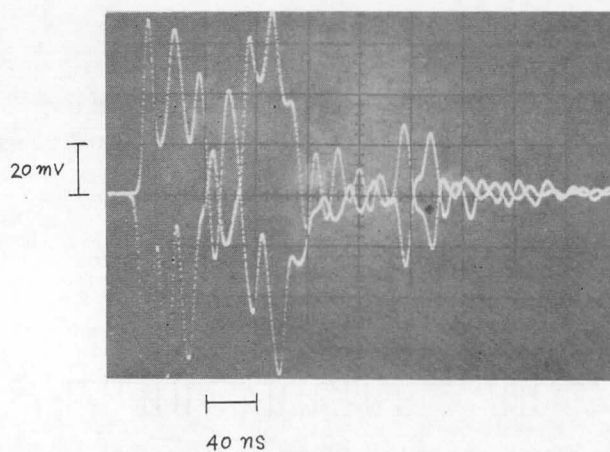


図 2.5 6 サイクル時間 40 ns での非破壊読出し
(上側：駆動パルス, 下側：読出し電圧)

また同一の駆動パルスと、 $t_r = t_f = 40 \text{ ns}$, $t_w = 20 \text{ ns}$ の情報パルスによる、書込みにつづいて読出しを行なったときの動作波形を図 2.5 7 に示した。書込みにともなう雑音は、書込み情報パルスの立上り時点から 200 ns 程度でほぼ収まっており、書込みサイクル時間として 120 ns が得られた。



(a) 駆動パルス（上側）と情報パルス（下側）



(b) 書き込み雑音の後につづく読み出し電圧

図 2.5 7 情報書込み後の非破壊読出し

2. 4. 3 動作領域拡大の検討

図 2.5 3 で示した情報電流振幅に対する動作許容範囲の上限は、主として磁性薄膜の磁壁クリープに対するしきい値であるので、磁性薄膜特性値の改善、均一化が必要である。

動作許容範囲の下限は、2.2.4 で述べたように H_{dw} ができるから、動作許容範囲を広げるには、書き込み時にもみ駆動パルス幅を広げ、 H_{dw} が時間とともに充分減衰した時点で情報パルスと一致をとって書き込みを行なうようにすればよい。

図 2.5 9 は、図 2.5 8 に示した測定パルス系列において、読出し駆動パルス幅を 80 ns に保ったまま、書き込み駆動パルス幅のみを 40 ns から 600 ns まで変化させたときの $I_d - V_0$ 曲線である。

書き込み駆動パルス幅を 40 ns から 120 ns に広げることによって、 I_d の下限を 60 mA 程度拡張することができる。

非破壊読出し記憶を、書換え可能な高速読出し記憶として用いる場合には、書換え所要時間の短縮に対してきびしい要求を課せられることはほとんどないので、この書き込み方式を適用して安定した動作を確保することが充分できる。主記憶においても書き込みサイクル時間の絶対値が高速であるので、この程度の書き込み駆動パルス幅の拡張は問題ではない。

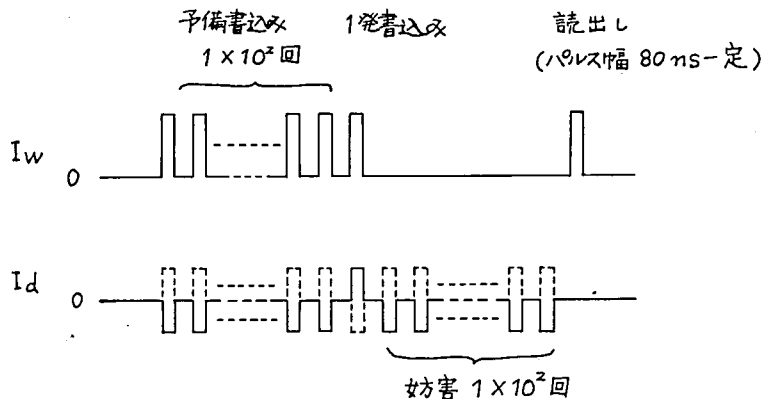


図 2.5 8 測定パルス系列

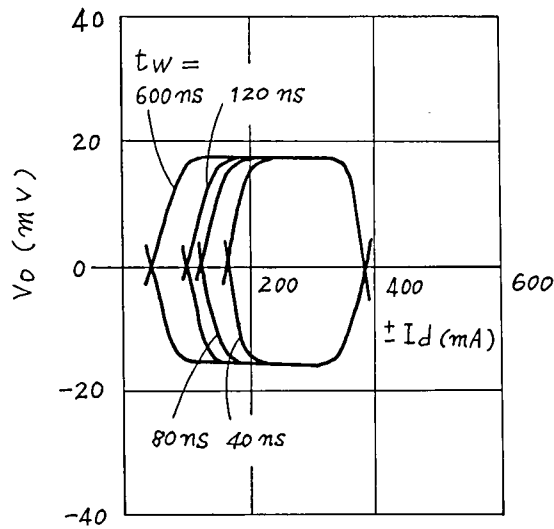


図 2.59 書き込み駆動パルス幅伸長の効果

2. 4. 4 本章の概要

非破壊読出し記憶の基本特性をマトリクス規模で確認し、動作余裕度、サイクル時間などの検討を行なうことを目的として、実験的に小規模の記憶平面を設計、試作した。

2スポット/ビット構成によって高速動作時における雑音の軽減をはかり、20dB程度の信号対雑音比を得た。情報電流 I_d の動作許容範囲は駆動電流 $I_w = 1.0A$ において $200 \pm 50mA$ であった。また駆動パルス幅の変動許容上限は120nsであった。また 1×10^8 回の連続読出しにおいても読出し電圧波形に変化のないことを確認した。

立上り時間7ns，立下り時間10nsの三角波駆動パルスによって読出しサイクル時間40ns，書き込みサイクル時間120nsを実現した。

さらに書き込み駆動パルス幅の伸長によって動作領域の拡大が効果的に得られることを示した。

2.5 結 論

平面形磁性薄膜が高速記憶素子としてすぐれた性能をもっていることに着目し、渦電流磁界を利用する非破壊読出し記憶を提案してその理論的、実験的検討を行ない、安定した高速の非破壊読出し動作が得られることを実証した。

本研究の内容は次の3点に大別することができる。すなわち、第1点は非破壊読出し現象の解明と安定した非破壊読出し記憶を実現するにあたっての磁性薄膜、記憶細胞構成、動作条件などに関する理論的検討である。第2点は理論の確認と記憶平面设计に必要な基礎データを得るための単位記憶細胞についての実験的検討である。さらに第3点は記憶平面の設計、試作と動作余裕度、動作速度などに関する実験的検討である。

研究の結果として得られた成果は次の通りである。

- (1) 金属基板上におかれた磁性薄膜の磁化が可逆回転する現象を見出し、非破壊読出し記憶素子として応用することを提案した。
- (2) 非破壊読出し動作が渦電流磁界に原因することを明らかにし、その理論的基礎を確立した。
- (3) 安定した非破壊読出し記憶素子を実現するために必要な磁性薄膜の形状、寸法、記憶細胞構造、動作条件などについて理論的、実験的に明らかにした。
- (4) 非破壊読出し記憶の動作余裕度、動作速度などについて検討し、安定した高速動作が得られることを実証した。
- (5) 非破壊読出し記憶の動作余裕度を拡大するための動作方式を提案し、その効果を実証した。

平面形磁性薄膜とその近傍に配置された金属導体とで構成される非破壊読出し記憶素子は、磁性薄膜に特殊な特性を要求することなく非破壊読出し特性を実現することができ、単純な構成、構造をもっている。また磁性薄膜に要求される特性条件、動作条件が比較的ゆるやかで、広い動作余裕度をもっている。さらに非破壊読出し動作は、読出しが行なわれるたびに記憶内容が自動的にリフレッシュされるので、原理的に無限回読出しに対しても記憶情報が破壊されることはない。またその布線構造は高速パルス伝送に適したストリップ線路構造をなしているので、本質的に高速動作に適しているといえよう。

今後に残された研究課題としての第一は記憶密度の向上であり、第二は動作電流値の低減である。大容量記憶においては素子のスイッチング速度よりも記憶布線の信号伝送時間

が動作速度を支配するようになるので、非破壊読出しの高速性を生かすためにも、記憶密度向上の検討が必要である。動作電流値の低減も、周辺回路を構成する半導体素子の電力損失を軽減して高速化をはかる上で重要となる。

第3章 円筒形磁性薄膜による

テープ・ケーブル形記憶素子の研究

3.1 序 論

3.1.1 円筒形磁性薄膜の作製

円筒形磁性薄膜は直径0.1～0.2 mmの銅合金線の表面にほぼ80% Ni - 20% Feの成分比をもつパーマロイを電気めつきして得られる。以下ではこれを磁性線とよぶ。パーマロイ電着中に加える配向磁界の方向に応じて、円周方向または軸方向に一軸異方性を付与することができる。円周方向の配向磁界は銅合金線に電流を流すことによって得られる。

銅合金線は、パーマロイ薄膜を支持する基体であると同時に、電着時のめつき電流ならびに記憶素子としての動作時におけるパルス信号の電氣的通路でもある。したがって平滑な表面、十分な機械的強度、良好な導電率などの条件が、それぞれ同時に満足されなければならない。また非磁性材料でなければならないことは、いうまでもない。こういった観点から、りん青銅線、ベリリウム銅線などの銅合金線が一般に用いられている。

本研究においては、ベリリウム銅線が比較的高価であり、わが国においては導電性ばね材料としてりん青銅が普及していて入手、加工が容易であることなどから、直径0.2 mmのりん青銅線を主として使用した。

りん青銅線の材質は5.5～7.0% Sn, 0.03～0.35 P, 残余はCuであり、導電率、引張り強さは加工経歴などによって変わるが、ほぼ15%, 60 kg/mm²程度である。

電解液としてはNiを硫酸塩として含む硫酸塩浴が広く用いられている。その他にもスルファミン酸浴、ピロリン酸塩浴などがあるが、本研究においては硫酸塩浴を用いた。硫酸塩浴の代表的な電解液組成と電着条件を表3.1に示した。塩化ニッケルは塩素イオンを供給するための配合であって、塩素イオンがないと陽極が不動態化して溶解が円滑でなくなり、電着の進行とともにPHが低下する。ほう酸は電解液の水素イオン濃度PHに対する緩衝剤である。

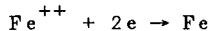
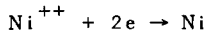
Ni - Fe合金電着は、標準単極電位系列からみて規則的でない、いわゆる異常共析⁽⁵⁸⁾

(Abnormalous Codeposition)

を示し、卑なFe (- 0.44V) の方が貴なNi (- 0.25V) よりも析出速度が大きい。このために電解液中の金属イオン濃度比 Ni^{++}/Fe^{++} は20~50と大きくとる必要がある。また電着初期においてはFe側に大きく偏移した合金組成を示す異常現象が存在⁽⁵⁹⁾するが、1.000Å以上の膜厚では一定組成比におちつく。磁気ひずみ係数は

Ni-Fe合金組成比に直接的に関係するが、このように膜厚方向に組成比変動があっても平均組成比が80%Ni-20%Fe付近にあれば問題はない。⁽⁶⁰⁾

電解液中のNiイオン、Feイオンは負電位に保たれている銅合金線表面で電子をとらえ、



(3.1)

なる反応でNi-Fe合金を析出する。電着膜の内部応力を軽減する目的から有機添加剤としてサッカリンが添加されるほか、下地表面のぬれを良くする目的でラウリル硫酸ソーダが加えられる。

電気めっきにおいては、ファラデーの法測にしたがって析出金属量は電気量に比例する。したがってパーマロイ薄膜の膜厚は電解電流、時間および陰極効率によって決定できる。ここで陰極効率は実際析出量の理論析出量に対する比であり、比較的電流密度が低く水素気泡の発生がない状態では100%と見なしうる。

円周方向に容易軸をもつ円筒形磁性薄膜では定常状態において磁路が閉じているので、減磁力による反磁区の発生を考慮することなしに膜厚を増加することができ、読出し電圧を比較的大きくとることができる。しかし膜厚を増加するにしたがい、主として渦電流損失によってスイッチング時間 t_s が遅くなるが、膜厚2μ以下では t_s は膜厚に依存しなくなる。⁽⁶¹⁾したがって本研究においては膜厚を1μ前後に設定した。

本研究において使用した磁性線は、東北金属工業株式会社、東光株式会社、沖電気工業株式会社、日本電気株式会社の各社に製造を依頼したが、その一般的な製造工程と主な制

第3.1 パーマロイめっき用硫酸塩浴の組成と電着条件の一例⁽⁵⁷⁾

液組成	硫酸ニッケル(7水塩)	320 g/ℓ
	塩化ニッケル(6水塩)	20 g/ℓ
	硫酸第一鉄(7水塩)	18 g/ℓ
	ほう酸	30 g/ℓ
電着条件	P H	2.8~3.0
	液温	55~60℃
	電流密度	10 mA/mm ²

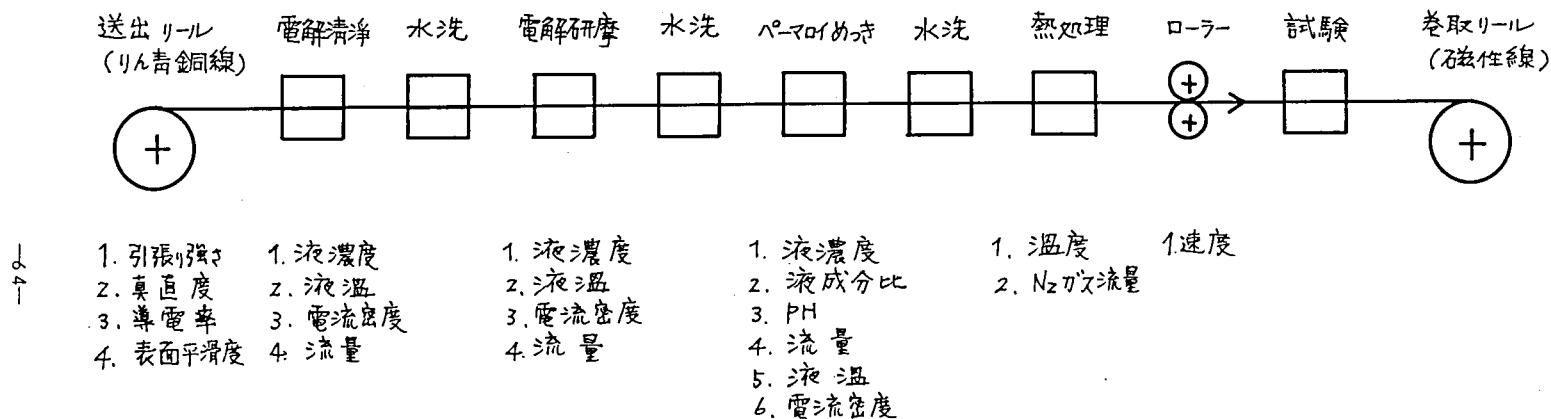


図 3.1 磁性線製造工程の概略と主要制御パラメータ

御パラメータを図 3.1 に示した。

りん青銅線を潤滑液中でダイヤモンド・ダイスを用いて表面状態に注意をしながら伸線したのち、不活性ガス中で熱処理して真直性をあたえる。表面傷は不均一めっきの原因となってビット不良を生ずるので慎重な処理が必要である。送出リールに巻かれたりん青銅線はKOHなどのアルカリ性液中で陰極電解して表面の油脂を除去したのち、りん酸液中で陽極電解して表面研磨する。パーマロイ電着中の配向磁界の大きさは20～300eである。電着直後に磁性線は不活性ガス（主としてN₂ガス）中で熱処理され、経時変化に対する安定性を高める⁽²⁸⁾。最後に製造工程と直結した検査装置でヒステリシスループ、妨害読出し電圧などを検査したのち巻取りリールにまかれる。

以上に述べたように、電気めっきによる磁性線の製造は比較的簡単な装置で検査工程をも含めた連続した一括生産ができるという特徴をもっている。しかし工程中の制御すべきパラメータの数が多いので十分な調整が必要である。

3.1.2 容易軸方向の選定

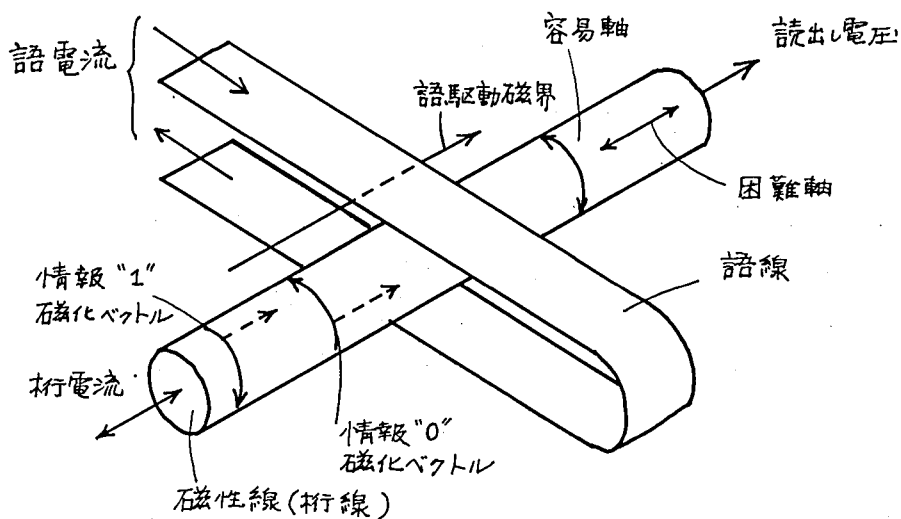
円筒形磁性薄膜についても、2.1.2で述べた基本特性が適用されるが、こゝでは形状からくる特質である容易軸方向の選定について述べる。

円筒形磁性薄膜は電着中の配向磁界の印加方向によって膜面内の任意の方向に異方性をつけることができる。このうち、らせん状に異方性をもつ磁性線は読み出し専用記憶素子として用いられる場合もあるが一般的でない。

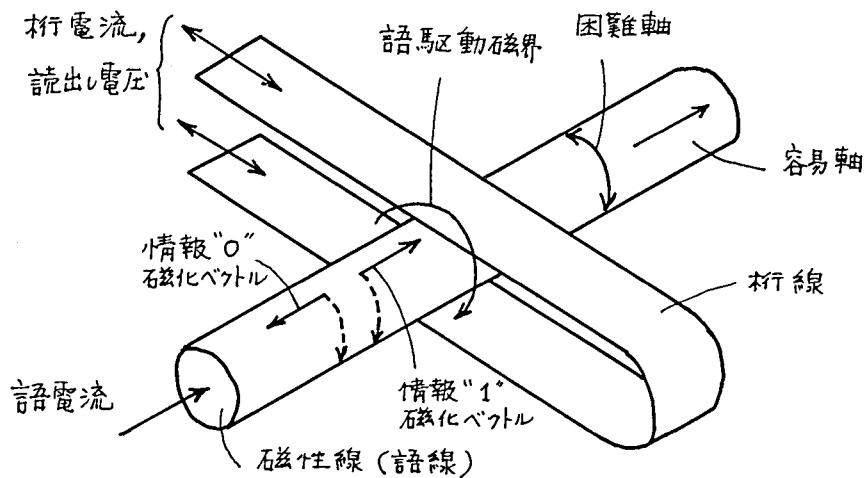
磁性線記憶細胞の基本構成は磁性線および磁性線と直交してこれととりかこむ布線とからなる。円周方向容易軸磁性線と軸方向容易軸磁性線とは、この基本構成のうちいずれを桁線とするか、いずれを語線とするかで、図3.2に示すように双対な関係にある。

定常状態では、円周方向容易軸線の磁路は閉じているが、軸方向容易軸線では開いているので減磁力の影響をうけて比較的短いビット長の単一磁区は存在することができない上、妨害磁界の影響を受けやすい。このため記憶密度を高くとることができない。

予備実験の結果では、同一磁性線上の隣接ビットからの相互干渉を受けないようにするには膜厚1μの軸方向容易軸磁性線記憶素子は同一膜厚をもつ円周方向容易軸素子に比較して少くとも3倍のビット間隔をとる必要があった。またI. Danylichukらは、読み出し電圧において同一レベルをうるためには軸方向容易軸線は円周方向磁性線よりも5倍の隣接ビット間隔を必要とすると報告している。⁽¹⁸⁾



(a) 円周方向容易軸記憶素子



(b) 軸方向容易軸記憶素子

図 3.2 磁性線記憶素子

以上の考察の結果から、その形状から由来する閉磁路構造の利点を生かすことを目的として、本研究においては円周方向容易軸磁性線を主体として検討を進めることとした。

3.1.3 テープ・ケーブル化の必要性

電話サービスの質的および量的向上を目的として、従来の機械式自動交換機にかわって電子交換機の実用化が必要とされるようになった。

電子交換機は実時間情報処理装置であって、中央情報処理装置が通話路の制御を行ない、時分割多重処理を通じてぼう大な呼処理を可能とする。制御部としての中央情報処理装置が高度の機能を発揮するためには、相互接続すべき出入線、交換機内部の状態、交換機に出入する情報などの大量のデータが保持され、常に最新の状態にあって、容易に早く利用できなければならない。したがって電子交換機における記憶装置の比重はきわめて大きい。

電子交換用記憶は、その機能からみて、交換動作中に交換機の内部状態やデータに関する情報を読み書きする一時記憶 (Temporary Memory, Call Store) と、電子交換操作を行なうための接続、サービス、料金登算、障害診断などのプログラムや加入者番号と機器番号、回線番号とのコード変換表などの固定情報を記憶する読出し専用記憶 (Read-Only Memory, Program Store) とに大別されるが、これらの記憶装置に共通して要求される条件は次の通りである。⁽⁶²⁾

- 1) 動作信頼度が高く、環境条件に対して安定であること。電子交換機が一般の商用計算機と異なって実時間で動作する情報処理装置であることから、加入者に対するサービス品質を高水準に保つために故障率は小さくなければならない。
- 2) ビット当り価格が低く経済的であること。電子交換機が従来の機械的交換機と置換しうるためには、交換方式上のコスト・バランスを考慮して、特に主要部分を占める記憶装置のビット当り価格が合理的でなければならない。
- 3) 記憶容量が大きいこと。一時記憶では加入者当り少くとも40～50ビット、読出し専用記憶では命令用として局規模には全く無関係に300～400万ビット、翻訳用に加入者当り少くとも200ビットが必要である。1万端子規模では一時記憶50万ビット、読出し専用記憶500万ビットが少くとも必要であり、二重化した場合にはこの倍の記憶容量が必要となる。
- 4) 保守、点検、取換えが容易であること。
- 5) 動作速度については加入者規模、サービスの種類、障害診断などの方式によって大

きく変るが、必ずしも高速である必要はない。記憶装置コストと方式設計とを勘案してきまるものであって、たとえば7数字市内分局で呼率6HCS、総呼量 5×10^4 HCSのときには、サイクル時間2 μ S程度の方式設計値となる。

6) 小形化、軽量化については動作速度、価格、信頼度などの向上に直接関連している場合の他は、2次的な問題と考えてよい。

磁性線記憶素子は、温度特性が良いこと、磁性線が連続一括生産できること、素子構成が比較的単純で量産性を有していること、高速動作が可能であることなどの点で、電子交換機用記憶に適する可能性をもっているが、さらに経済化、高信頼化、大容量化をはかる上で問題があった。

本研究においては以上の問題を解決することを目的として、磁性線の多数を同一平面上に平行に配列し、高分子フィルムで被覆してテープ・ケーブル状に成形した磁性線テープ・ケーブルについて検討を行なった。

テープ・ケーブルは、図3.3に示すように、互いに独立した多数条の導体を可撓性のあるプラスチック・フィルムではさむか、もしくは埋めこんで、それぞれを絶縁した単一のテープ状構造となすものである。⁽⁶³⁾配線材として用いるときは一般に導体として銅箔を用いるのでフラット・ケーブルともよばれる。

テープ・ケーブル化した記憶素子としては、ベル電話研究所におけるツイスタ記憶があるが、これは銅線上に10⁽⁶⁴⁾
 μ 厚のモリブデン・パーマロイ・テープをらせん状にまき

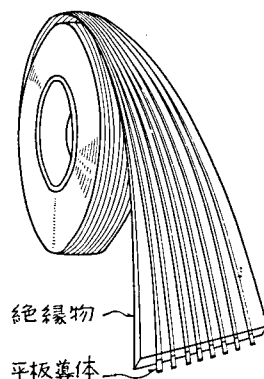


図3.3 テープ・ケーブル

つけたものをテープ・ケーブル化し、記憶情報はケーブル上に配置された永久磁石の着磁、減磁で蓄積し、パーマロイ・テープ線は永久磁石の着磁状態を検出する手段にすぎない読出し専用記憶であるので、一時記憶として高速で読み書き動作をさせる比較的薄い膜厚をもつ電着磁性線のテープ・ケーブル化には問題が残されていた。

磁性線テープ・ケーブルによる記憶スタックの構成例を図3.4に示す。テープ・ケーブル化した語線とはり合わせ構造をとることによって、スタック組立はきわめて単純化される。またテープ・ケーブルが可撓性をもつことを利用して折りたたみ構造をとることにより、記憶平面間の相互接続点をなくすことができる。さらに磁性線表面がプラスチック・フィルムで完全におおわれるので、腐食性雰囲気から磁性線を保護することができる。

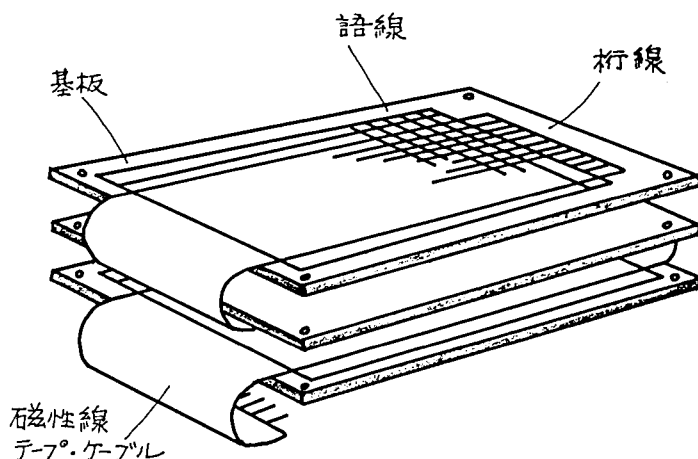


図 3.4 磁性線テープ・ケーブルによる

記憶スタック構成の一例

いま、20万ビット記憶容量の記憶スタックについて、3Dフェライト磁心記憶と磁性線記憶の接続点数を試算すると表3.2のようになる。記憶スタック本体の故障率はほとんど接続点数でまってしまうので、磁性線テープ・ケーブル記憶は、信頼度の向上と接続工数の低減に効果的である。

表 3.2 接 続 点 数 の 比 較

3D フェライト磁心記憶	256 語長磁性線記憶	磁性線テープ・ケーブル記憶
204,800ビット	204,800ビット	204,800ビット
4,096語 50ビット	2,048語100ビット (2交点1ビット)	2,048語100ビット (2交点1ビット)
X線ハンダ点数 $64 \times 2 \times 50 = 6,400$ Y線ハンダ点数 $64 \times 2 \times 50 = 6,400$ I線ハンダ点数 $2 \times 50 = 100$ S線ハンダ点数 $2 \times 50 = 100$ X線相互接続点数 $64 \times 2 \times 49 = 6,272$ Y線相互接続点数 $64 \times 2 \times 49 = 6,272$	語線ハンダ点数 $2,048 \times 2 = 4,096$ 桁線ハンダ点数 $100 \times 2 \times 2 \times 8 = 3,200$ 桁線相互接続点数 $100 \times 2 \times 2 \times 7 = 2,800$	語線ハンダ点数 $2,048 \times 2 = 4,096$ 桁線ハンダ点数 $100 \times 2 \times 2 = 400$
計 25,544	計 10,096	計 4,496

したがって磁性線をテープ・ケーブル化することによって得られる利点を要約すると次のようになる。

- 1) 記憶スタック組立工数の低減による経済化。
- 2) 信頼度の向上。
- 3) 経済性, 信頼性を満足する記憶スタックの大容量化。

また問題点としては, ケーブル成形後に不良ビットが発見されても磁性線を交換することは不可能であり, また長尺の磁性線を必要とするので, 磁気ひずみ係数が零に制御された, 特性ばらつきの少ない磁性線の, 安定した製造法の確立が必要である。ケーブル成形条件, 記憶スタック設計条件の適切な設定により, この問題は緩和することができる。

3. 1. 4 本章の概要

本研究において用いた円筒形磁性薄膜の電気めっきによる作製方法について述べ, 記憶密度の点から円周方向に容易軸を有する磁性線が望ましいことを結論した。

つぎに電子交換機用記憶装置に要求される信頼性, 経済性, 大容量性などの条件を満足することを目的として, 磁性線のテープ・ケーブル化を検討するにいたった経過について述べ, その利点と問題点を明らかにした。

3. 2 磁性線テープ・ケーブルの検討

3. 2. 1 ケーブル構造と成形工程

テープ・ケーブルの基本的な構造は, 導線の多数を一平面上に平行に配列し, これを2枚のプラスチック・フィルムで上下からはさんでサンドイッチ状に成形したものである。

プラスチック・フィルムの材質は使用目的や条件によって選定される。記憶部品としての観点からは次の条件が必要である。

- 1) 固有抵抗が大きいこと。
- 2) 誘電率が小さいこと。
- 3) 誘電損が小さいこと。
- 4) 引張り強度が大きいこと。
- 5) 薬品, とくに溶剤に対する耐性があること。

6) 許容温度が高いこと。

このうちで第2項は、磁性線と語線との結合静電容量とそのばらつきをおさえるために必要な事項である。

以上の条件からポリエステル系フィルムを選ぶこととし、具体的にはポリエチレン・テレフタレート・フィルムを基体とし、これにポリエチレン・フィルムをはりあわせたテープを使用することとした。はりあわせは、ポリエステルをアルキル酸チタネートで活性化処理した後でポリエチレンを熱圧着して行なう。ポリエチレンのはりあわせは、ポリエステル・フィルム単体では導体のヒート・シールが困難であり、導体を完全に埋めこむことができず空隙が残るために、接着と充てんの役割をもたせることを目的としている。

ポリエチレン・テレフタレートおよびポリエチレンの特性値を表3.3に示した。

磁性線ケーブルを成形することを目的として準備したケーブル成形機の構成を図3.5に示す。

磁性線を取り扱うことから、構成上注意した点は次の通りである。

- 1) 磁性線にひずみが加わらないよう、直線状のまま工程中で処理されるようにする。
- 2) 磁性線を正確に位置ぎめするために、まず上側テープに磁性線を軽く埋めこんだ後、下側テープを供給して成形するようにする。
- 3) 磁性線に加わる張力になるべく小さくなるように、磁性線供給リールの逆張力を調整できるようにする。

図3.5において、磁性線リールから供給された磁性線は、セパレータによって線間隔を位置ぎめされた後、第一の成形ロールに送りこまれる。このとき多数の磁性線リールを収容するスタンドからセパレータへの磁性線の入射角は最大でも $1^{\circ}30'$ をこえないよう、セパレータとスタンド間の距離を充分にとるようにしてある。

第一成形ロールではまず上側テープが供給され、磁性線の配列間隔にしたがって溝加工した表面をもつ金属ロールと、金属ロール中に設けられた発熱体によって加熱された加圧ロールとによって一次成形が行なわれる。

ついで第二成形ロールにおいて下側テープが供給され、加熱された金属ロールと加圧ゴム・ロールとによって完全な成形が完了する。成形を容易にするため第二成形ロールに入る上側および下側テープは赤外線ヒータで予備加熱される。

第二成形ロールから出たケーブルはブローからの冷却風によって冷やされ、所定のテープ幅になるようエッジ・カッターで耳をきりおとされたのちリールに巻取られる。

表 3.3 プラスチック・フィルムの特 性⁽⁶³⁾

材 料 \ 特 性	比 重	引張り強度 (kg/mm ²)	伸 び 率 (%)	体積抵抗率 ($\Omega \cdot \text{cm}$)	誘 電 率 (1KHz)	誘電正接 (%)	耐 薬 品 性				使 用 温 度 (℃)	
							酸	アルカリ	油	溶 剤	低 温	高 温
ポリエチレン・ テレフタレート	1.38 ~1.39	12.0 ~17.0	70 ~130	10^{17}	3.1 ~3.2	0.4 ~0.5	○	○	○	○	-60	120
ポリエチレン (低密度)	0.91 ~0.93	1.4 ~3.0	50 ~600	10^{17}	2.3	0.05	○	○	○	○	-60	70

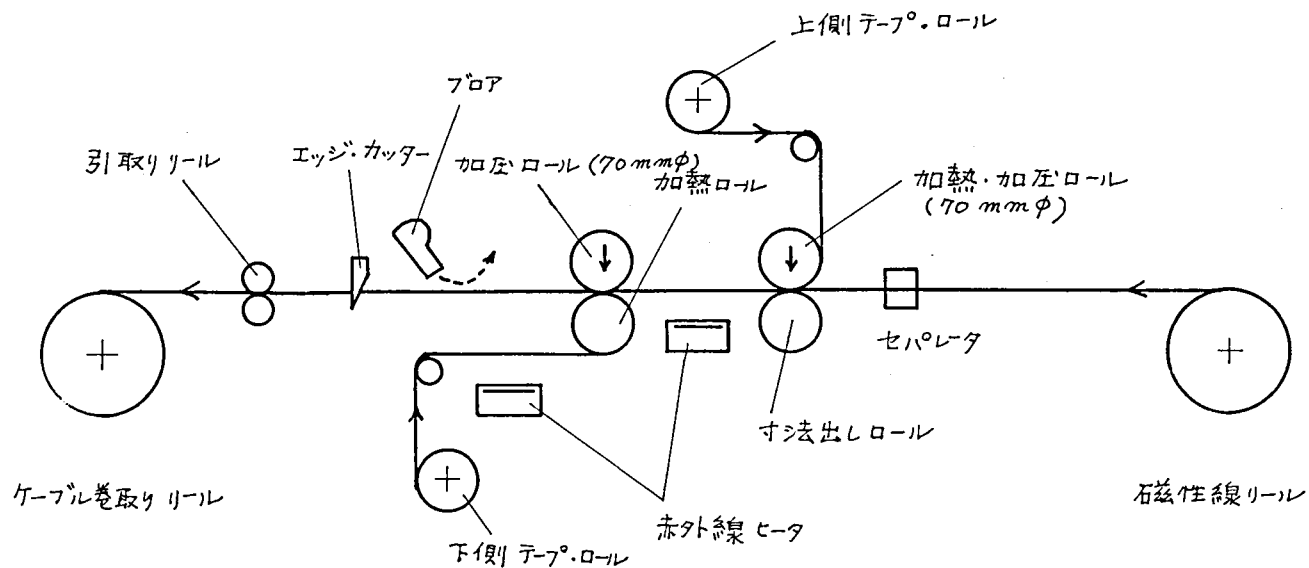


図 3. 5 磁性線ケーブル成型機の構成

以上の工程において、加熱温度約 130°C 、加圧約 5 kg 重、成形速度約 1 m/分 程度が良好なケーブル成形を行なうのに適当な条件である。磁性線ケーブルの成形条件については、3.2.2において、さらに検討を行なう。

3.2.2 磁性線ケーブルの試作

対をなす磁性線と語線との2交点を1ビットとして用いるものとして、50対の磁性線を収容する図3.6および図3.7に示す構造寸法の磁性線ケーブルを試作し、テープ・ケーブル化にともなう問題点として、仕上り形状、寸法、記憶特性などを検討することとした。⁽⁶⁵⁾⁽⁶⁶⁾

対をなす磁性線の中心間距離は 0.5 mm 、対同志の中心間距離は 2.0 mm とした。このとき端末における接続点の平均距離は 1.0 mm となり、端末処理上の技術的困難はないと考えられる。

2交点/ビット方式の採用は、読出し電圧レベルの倍加と、語線からの結合静電容量を介する同相雑音の抑圧とによる信号対雑音比の向上、ならびに1交点に欠陥があっても他の1交点によって最低読出しレベルを保証することによる磁性線ケーブルの信頼度向上を目的としたものである。

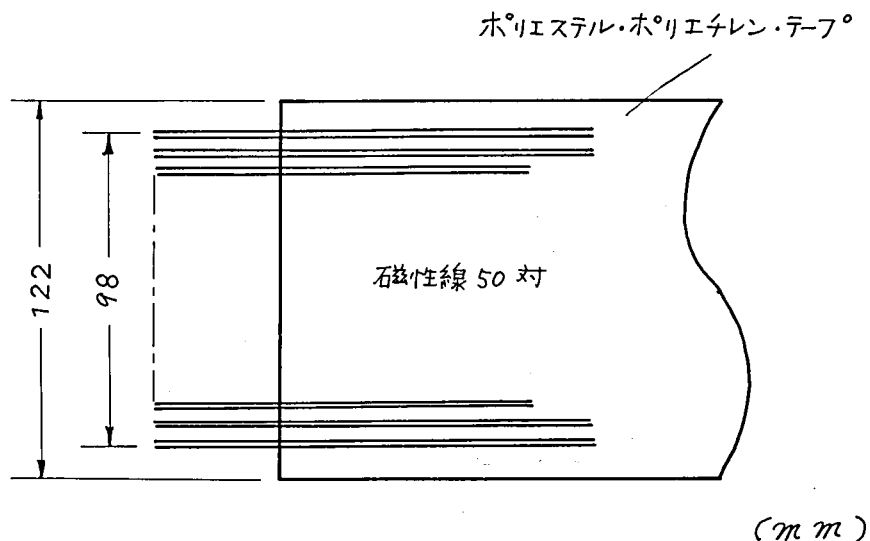


図 3.6 試作磁性線ケーブルの寸法

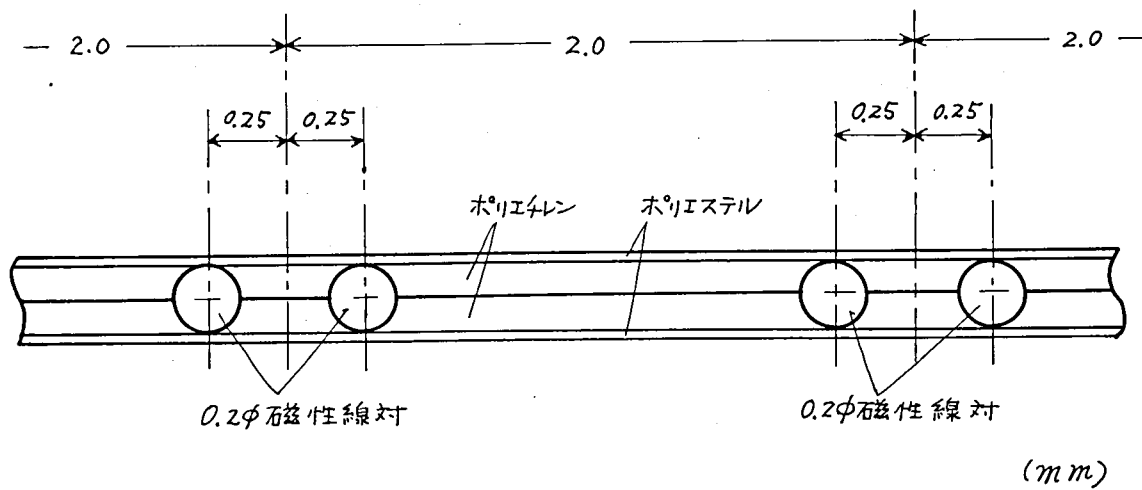


図 3.7 試作磁性線ケーブルの断面

プラスチック・フィルムとしては、語線電流による駆動磁界発生効率を良くするためにテープ・ケーブル厚みを出来るだけ薄くすることとし、厚み 25μ のポリエチレン・テレフタレート・フィルムを用いることとした。またポリエチレン・フィルムの厚みは、磁性線をはさんで配置されたポリエチレン・テレフタレート・フィルム間の空隙を充てんするものとして、 80μ に選んだ。

すなわち磁性線対同志の距離を p 、磁性線の半径を r 、ポリエチレン・フィルムの厚みを t とすると

$$2tp = 2rp - 2\pi r^2$$

したがって

$$t = r(p - \pi r) / p \quad (3.2)$$

となる。図3.7に示した寸法においては $t \approx 84.2\mu$ である。

ケーブル成形条件の範囲を定めるために、成形工程中で磁性線が受ける応力に対する記憶特性変化を検討することとした。

磁性線はロールによって押し出される形になるので、ねじり応力は無視することとし、引張り応力と磁性線の断面方向に対する圧縮応力とを考えることにする。

磁性線は任意の2ロットを選び、図3.8に示す測定パルス波形と図3.9に示す測定パルス系列で妨害読出し電圧 DV_0 。(情報0に対する出力を DV_z 、情報1に対する出力を DV_1 とする)を測定した。

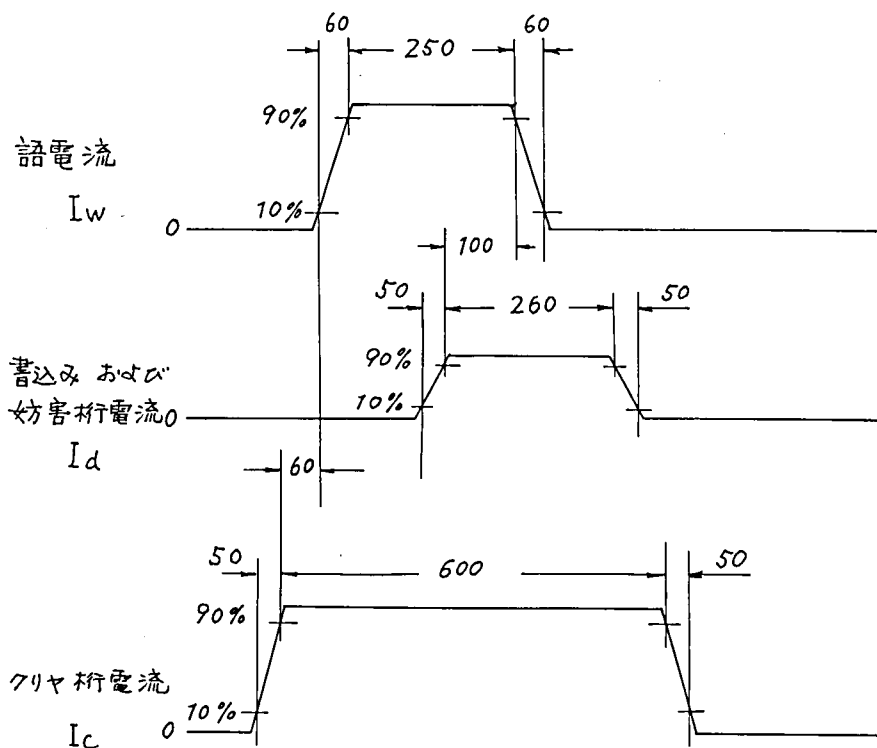
語線は2ターンとし、引張り応力に対する特性を測定するときには、水銀接点を介して桁電流パルスおよび読出し電圧のための電氣的接点とし、磁性線をはさんでの上、下語線間隔は 0.4mm にとつて磁性線が自由に動けるようにした。磁性線の一端は固定し、他端に引張り応力を加えた。磁性線断面に対する圧縮応力について測定するときには、磁性線の下部に平板をおき、磁性線と直交しておいた $70\text{mm}\phi$ のロールを介して応力を加えた。

測定結果を図3.10および図3.11に示した。^{*}これらの結果から磁性線に加える逆張力は安全をみて 50g 以下とすることにした。また加圧ロールの荷重は一磁性線当り 400g 程度でも問題ないことがわかった。

したがって3.2.1で述べた成形条件を考慮し、表3.4に示す3通りの組合せ条件で試作を実施することとした。

磁性線はケーブル端部から15対目、25対目、30対目に挿入し、対の一方を磁性線、他方は同径のりん青銅線とした。また上記の対以外もすべてりん青銅線とした。

—76—
*図3.10からみて、磁性線のねじりひずみはやや負であり(N_z 負)、引張り応力による異方性磁界の増加により、書込みにくくなるものと考えられる。



(ms)

図 3. 8 測定パルス波形

約 50 m 長の磁性線を用意し、そのうち最初の 1 m を試料として保存し、残りを 3 分割してそれぞれ成形条件 A, B, C でフラット・ケーブル化した。実際には分割した磁性線の間をりん青銅線でつなぎこんで連続した 1 リールとし、成形機は連続運転したまま、成形条件を調整して定常状態に入ったのちに、磁性線部分が成形されるようにした。

また完成した磁性線ケーブルはリールに巻きとらずに、1 m 毎に切断して平板上におき、曲げによる記憶特性の変化を別に検討することとした。送り出し用の磁性線リールは 200 mm φ であって、リール巻付けによる記憶特性変化は認められなかった。

配列した磁性線の概要を表 3. 5 に示した。

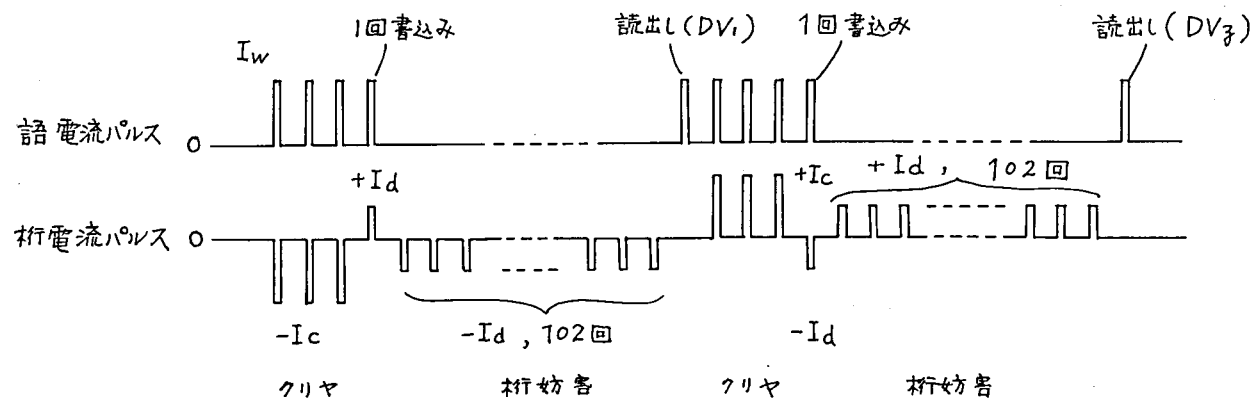


図 3. 9 測定パルス系列 (クロック周波数 200 KHz)

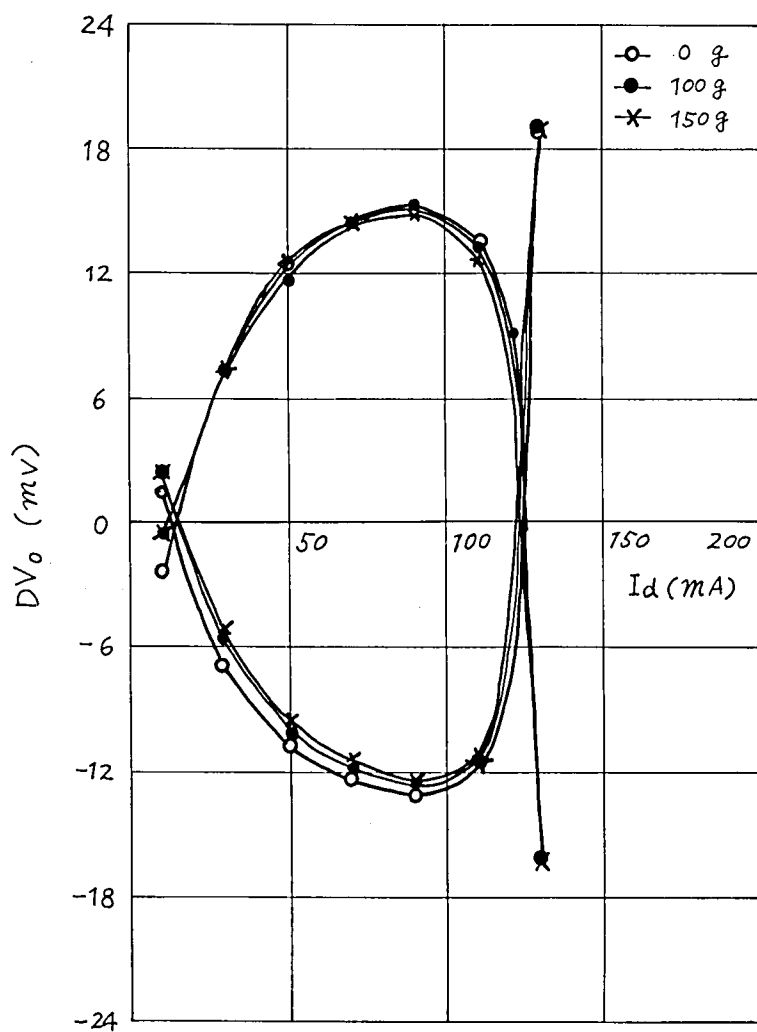


図 3.10(a) 引張り応力に対する磁性線の記憶特性
(ロット#012, $I_w = 960$ mA, $I_c = 300$ mA)

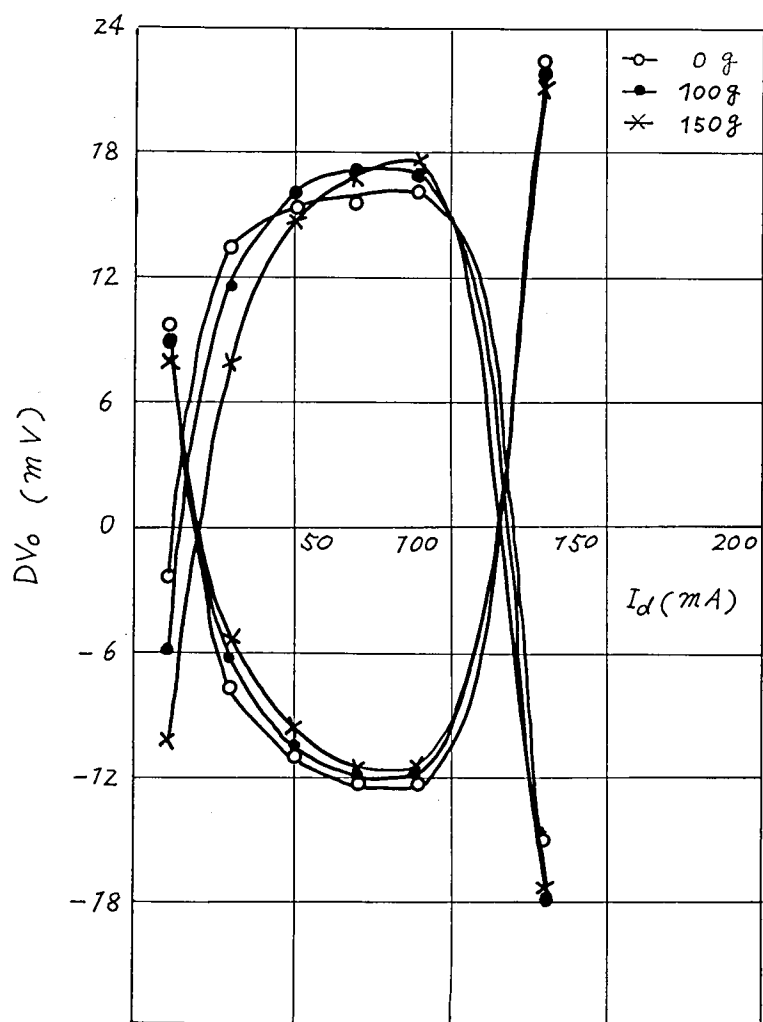


図 3.10(b) 引張り応力に対する磁性線の記憶特性

(ロット#014, $I_w = 960$ mA, $I_c = 300$ mA)

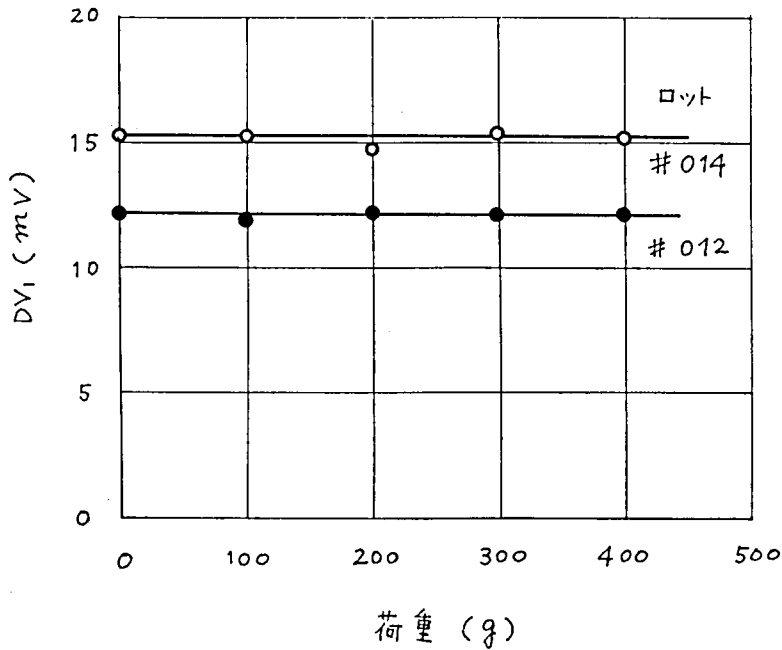


図 3.1.1 断面方向応力に対する磁性線の読出し電圧

($I_w = 600 \text{ mA}$, $I_c = 300 \text{ mA}$, $I_d = 50 \text{ mA}$)

表 3.4 試作磁性線ケーブルの成形条件

成形条件	ロール温度 ($^{\circ}\text{C}$)	ロール圧力 (kg)	成形速度 (m/分)
A	130	3.5	1.3
B	130	10.0	1.3
C	140	3.5	1.3

表 3.5 試作ケーブル用磁性線の概要

磁性線番号	心線材	心線径 (mm)	パーマロイ 膜厚(μ)	製造会社
#02	りん青銅	0.2	1	A社
#04	りん青銅	0.2	1	B社
#05	りん青銅	0.2	0.7	B社

3. 2. 3 成形条件によるケーブル形状の変化

試作した磁性線ケーブルを図 3. 1 2 に示す。

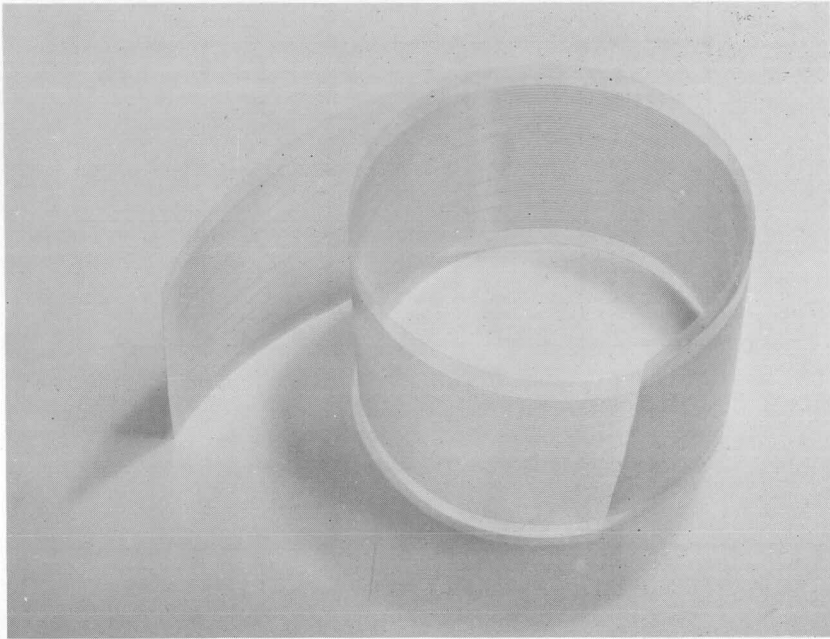


図 3. 1 2 試作磁性線ケーブル

図 3. 1 3 (a), (b), (c) はそれぞれ成形条件 A, B, C による磁性線ケーブルの透過光による写真である。

条件 A においては、磁性線対の近辺に軸方向に沿うはっきりとした空気層の存在が認められた。これは上側テープと下側テープとが完全に融着していないためである。

条件 B においては完全な熱圧着が完成している。

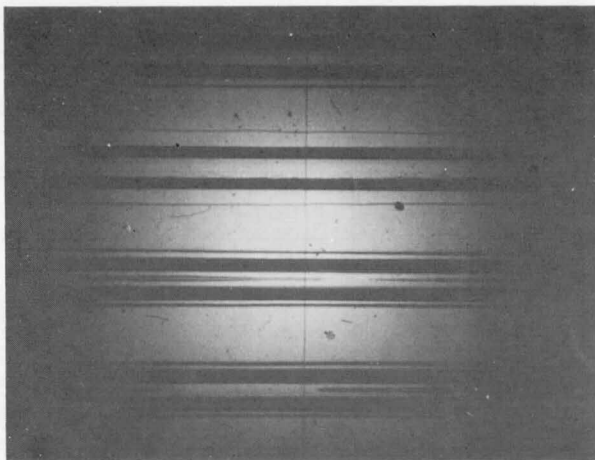
条件 C においても熱圧着は完全であるが、ケーブルの両耳の部分において斜めに走るしわが全体にわたって認められた。

したがって構造上からは成形条件 B が適当であると結論できる。

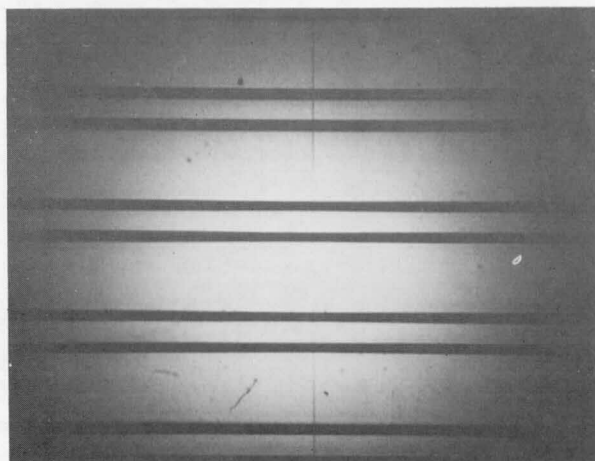
条件 B における磁性線配列寸法の測定結果の一例を図 3. 1 4 に示した。

測定はケーブルの下部から 50 μ 幅のスリットを通して光をあて、これと対向してケーブル上部に光電池をおき、検出部を導体が通過するとき記録紙に打点されるようにした。測定点が 0.5 mm 周期で検出点を通過すると横軸に沿って一直線状にならんで打点される。測定はケーブルの長さ方向に 10 cm おきに 6 か所測定した。

(a) 成形条件 A



(b) 成形条件 B



(c) 成形条件 C

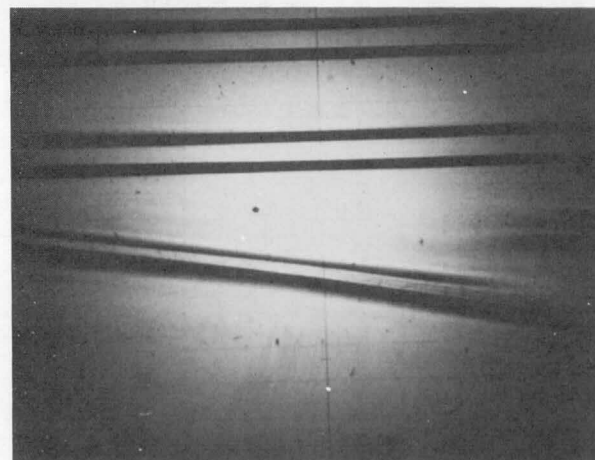


図 3.13

各種の成形条件による
磁性線ケーブルの透過
写真

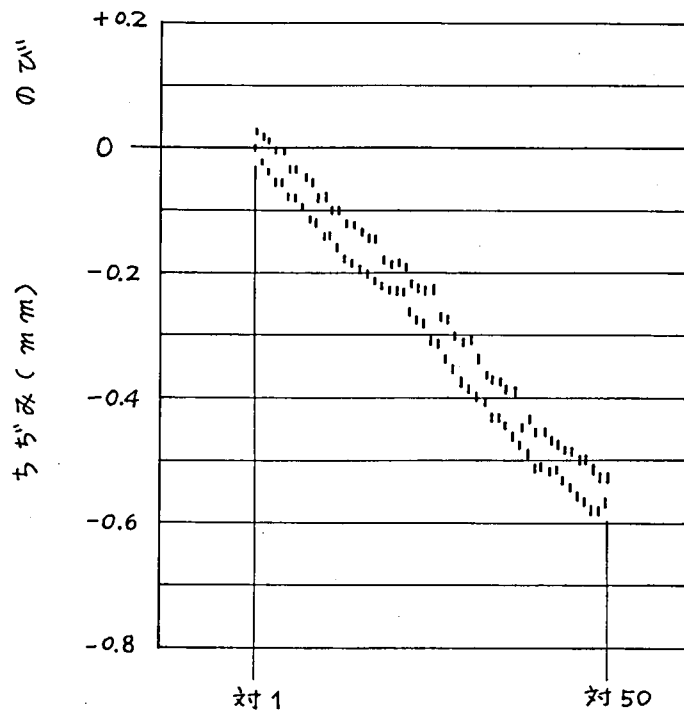


図 3.1.4 試作磁性線ケーブルにおける磁性線

配列寸法精度 (成形条件 B)

対をなす磁性線の中心間距離は一樣に平均して約 0.05 mm のびていた。また各対の中心間距離は一樣に平均して 0.012 mm 程度ちぢんでおり、50 対分の累積で約 0.6 mm のちぢみであった。この程度のずれでは端末における端子との位置ずれは支障がない。寸法出しロールの溝間隔を修正して補正すること 表 3.6 試作磁性線ケーブルの仕上り厚み

により累積誤差を一桁以上改善することができる。

表 3.6 に試作ケーブルの仕上り厚みを示した。これからも条件 A では熱圧着が不十分であることがわかる。成形条件 B

成形条件	磁性線部分の仕上り厚み (mm)
A	0.29~0.31
B	0.27~0.28
C	0.27~0.28

および C における厚みの期待値 0.25 mm からのずれは、ポリエステル・ポリエチレン・フィルム の厚み誤差によるものと推定される。

3.2.4 成形条件による記憶特性の変化

テープ・ケーブル化による磁性線記憶特性の変化を検討するために、ケーブル化しなかった磁性線と、3.2.3において適切な成形条件であると判断された成形条件Bの磁性線ケーブルとの記憶特性の相互比較を行なった。

磁性線ケーブルの記憶特性測定回路の構成を図3.15に示した。

試作ケーブルは約30cmの長さに切断して図3.16に示す測定治具に挿入し、図3.17に示す断面構造をもつ語線テープ・ケーブルで上下から密着してはさむ。語線は2ターンであって、3mmおきに約7.2mmにわたって設けてあり、全部で25個の測定点を順次測定することができる。

測定パルス波形および測定パルス系列は図3.8および図3.9におけると同じであり、 $I_w = 600\text{mA}$ 、 $I_c = 300\text{mA}$ とした。

ケーブル化しなかった磁性線の測定条件も上記と同一であるが、磁性線を厚み40μのポリエチレン・テレフタレート・フィルムで上下からはさみ、テープ・ケーブルの場合とほぼ同じ形状寸法となるようにした。

ケーブル成形しない磁性線と、した磁性線との、柵電流 I_d に対する妨害読出し電圧のせん頭値 V_0 。(無妨害読出し電圧 UV_0 と特に区別する必要がない限り、以後において妨害読出し電圧 DV_0 を V_0 と略記する。)の曲線を、磁性線#02、#04、#05についてそれぞれ図3.18、図3.19、図3.20に示した。それぞれの図において、25個の測定点における V_0 の最大値と最小値を細い実線で、平均値を太い実線で記入した。 $I_d - V_0$ 曲線の肩を過ぎた点では、記憶情報が妨害をうけて磁壁移動によって反転する様子がゆらぐため、読出し電圧の再現性が悪化し、シンクロスコープ上で図3.21に示すような広がりをもつ波形が観測されることが多い。このような場合には、ほぼ平均レベルをもって読出し電圧の値とした。

記憶特性の変化を評価するために、 $I_d - V_0$ 曲線において図3.22に示すように、書込み開始柵電流 I_{d1}^{\pm} 、情報破壊柵電流 I_{d2}^{\pm} 、最大読出し電圧 V_{om}^{\pm} 、柵電流 I_{d0}^{\pm} における読出し電圧 $V_0^{\pm}(I_{d0})$ を測度として定義する。

また正、負両出力に対する平均値として

$$\left. \begin{aligned} I_{d1} &= (|I_{d1}^{+}| + |I_{d1}^{-}|) / 2 \\ I_{d2} &= (|I_{d2}^{+}| + |I_{d2}^{-}|) / 2 \\ V_{om} &= (|V_{om}^{+}| + |V_{om}^{-}|) / 2 \end{aligned} \right\} \quad (3.3)$$

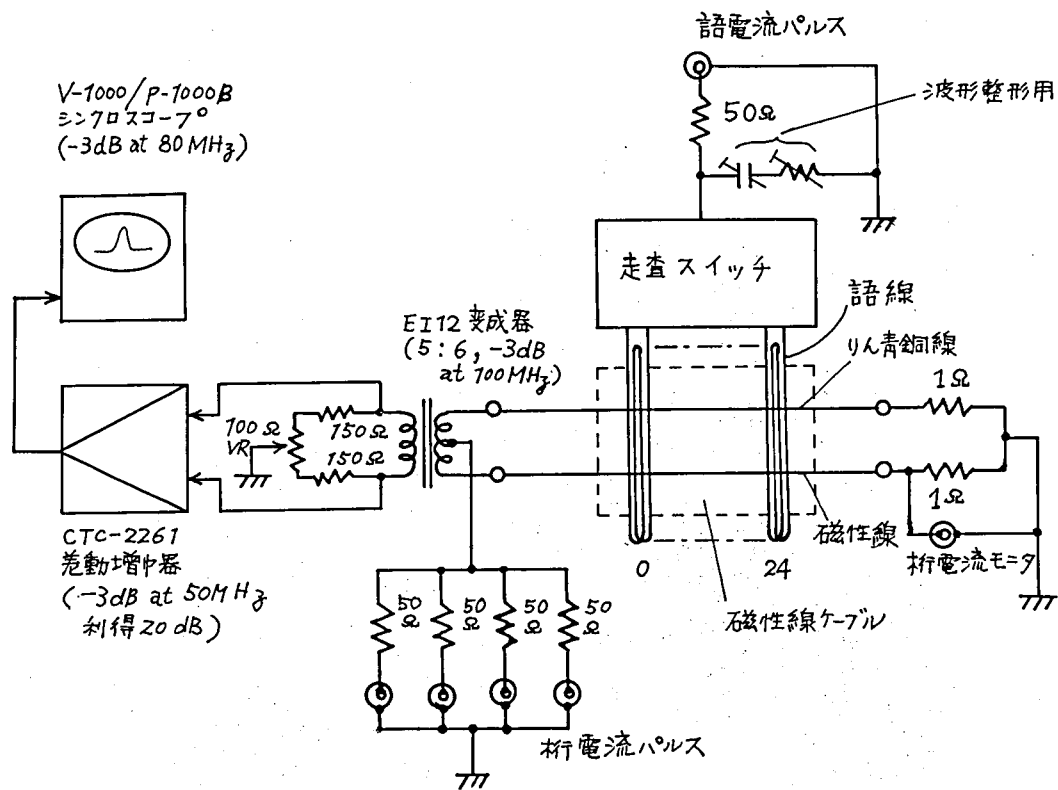


図 3.15 記憶特性測定回路

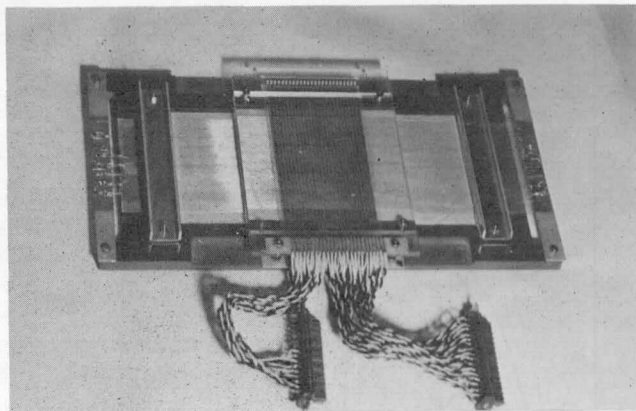


図 3. 1 6 記憶特性測定治具

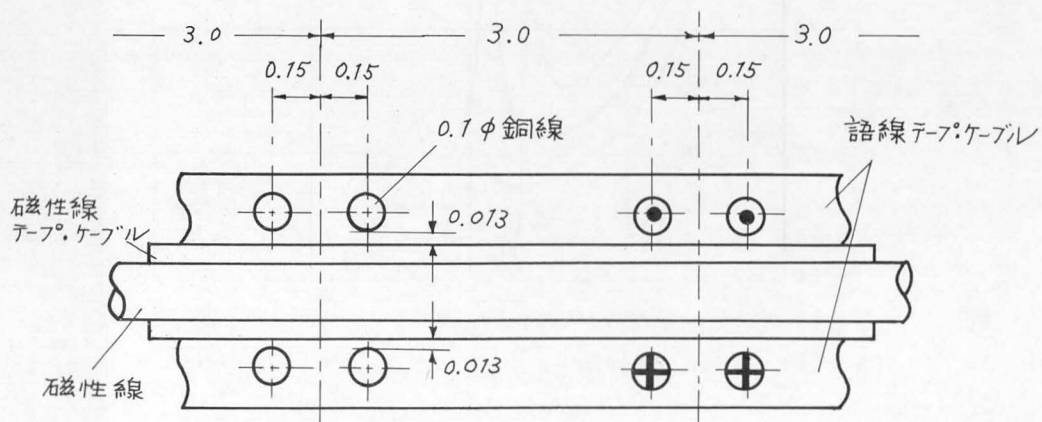


図 3. 1 7 語線構造の断面

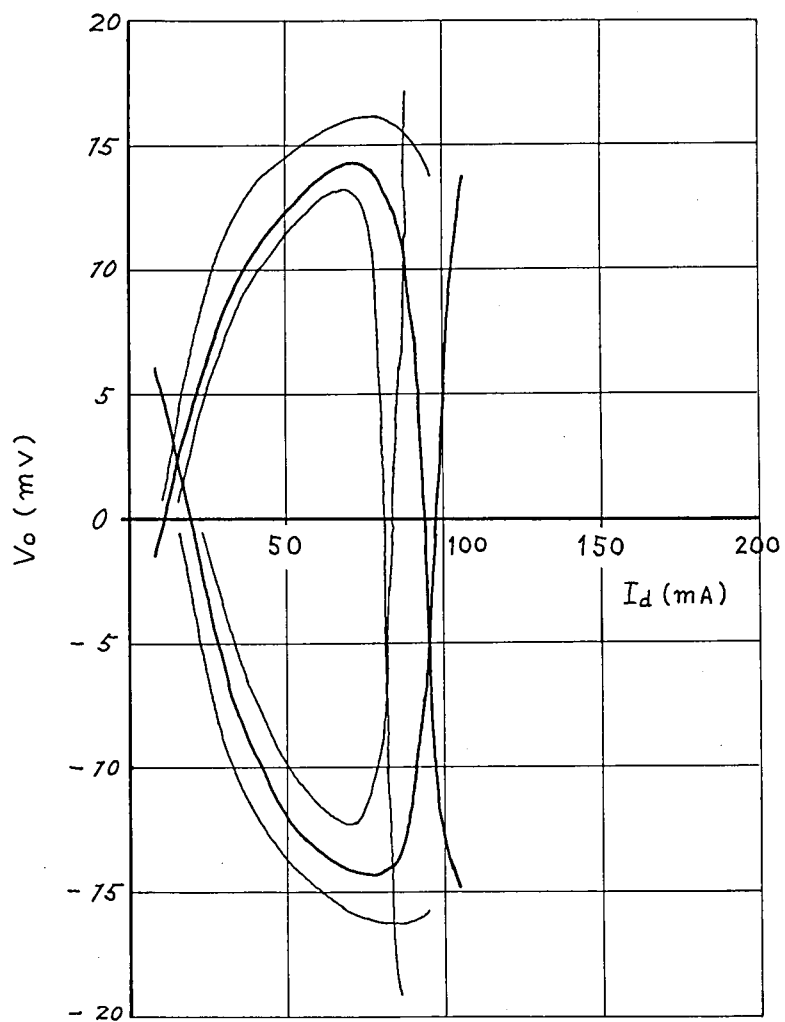


図 3.18(a) 磁性線 # 02 の $I_d - V_o$ 曲線

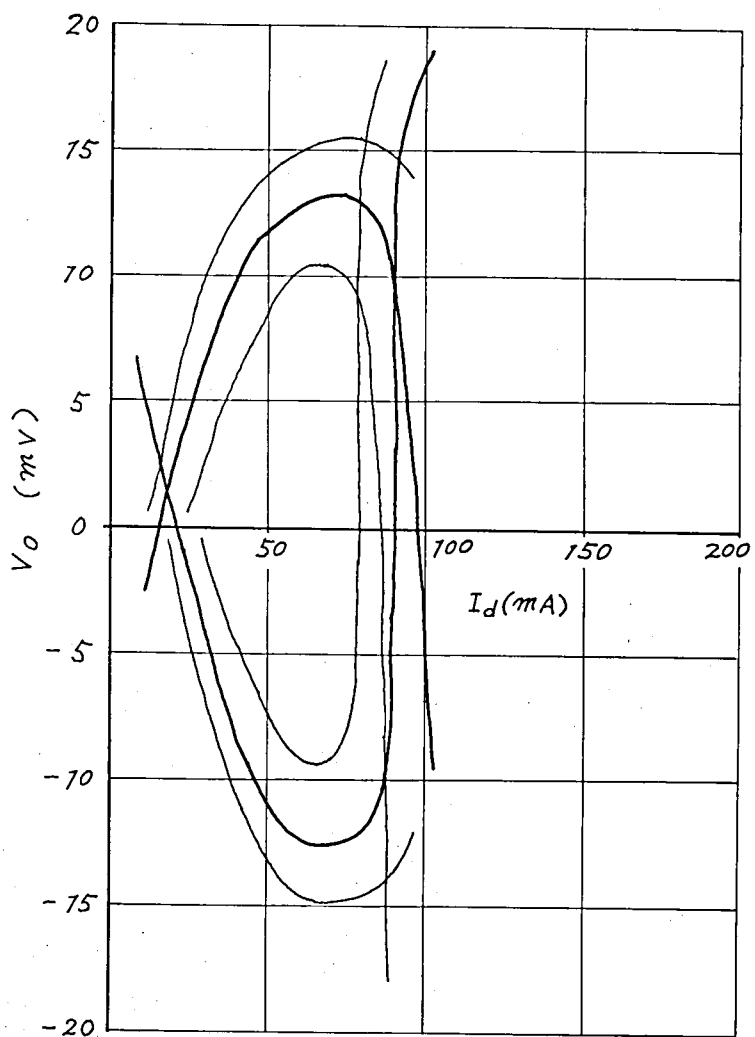


図 3.1 8(b) 磁性線 ケーブル井 0 2 の $I_d - V_o$ 曲線

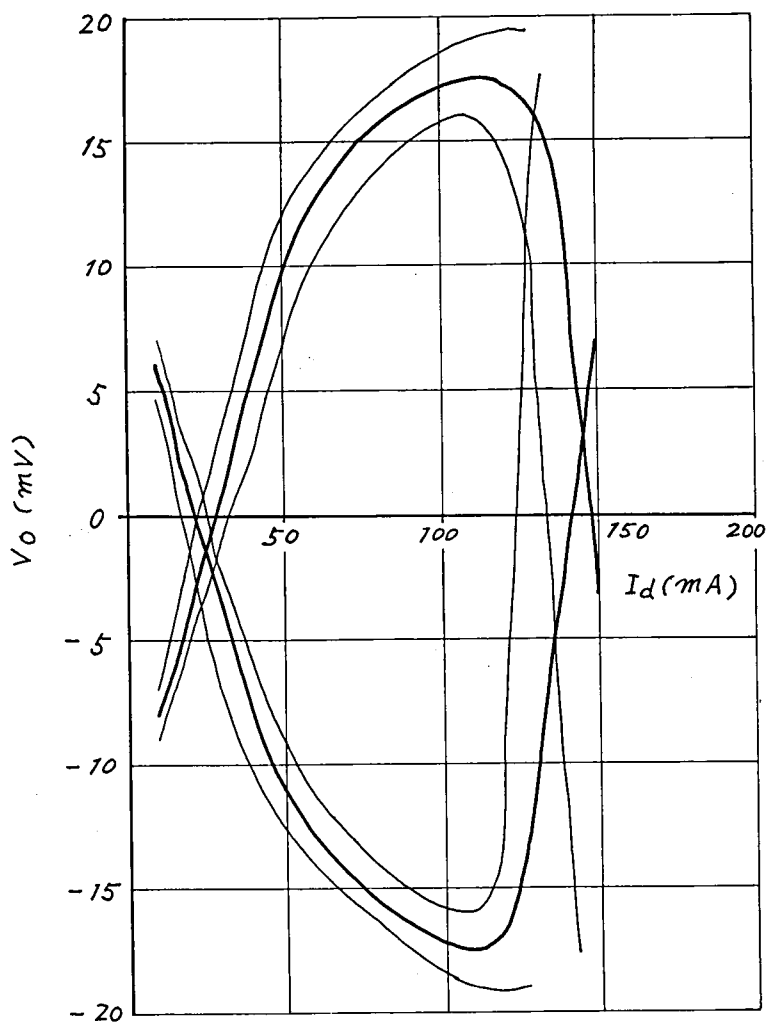


図 3.19(a) 磁性線 0.4 の $I_d - V_o$ 曲線

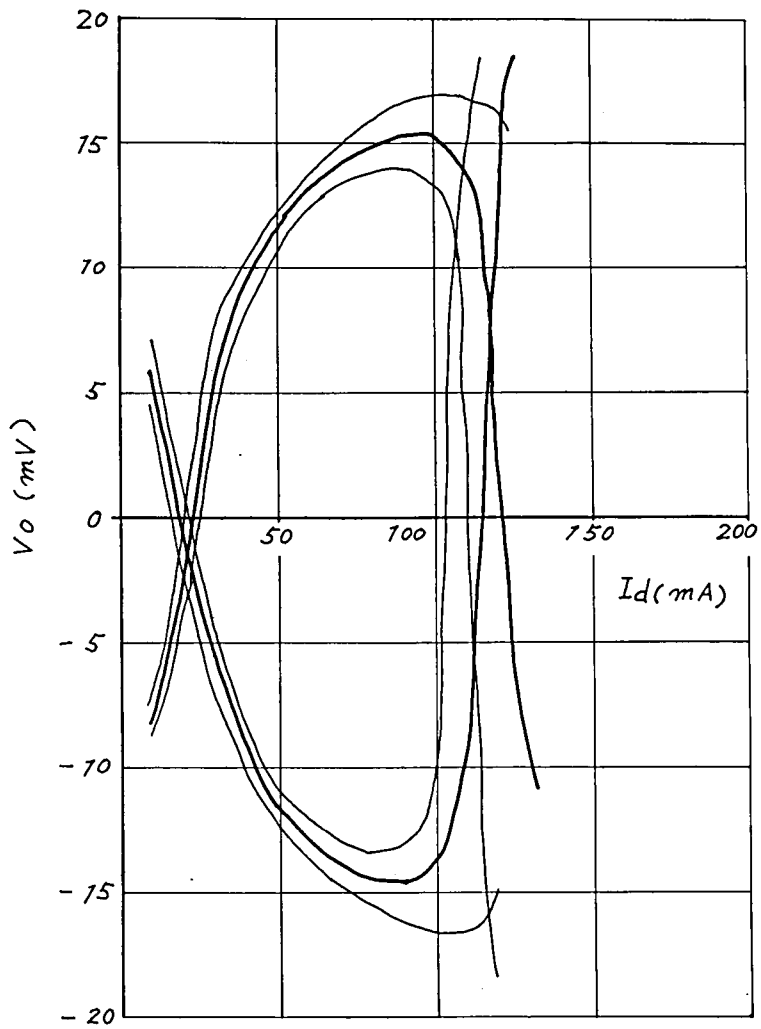


図 3.19(b) 磁性線ケーブル井 04 の $I_d - V_o$ 曲線

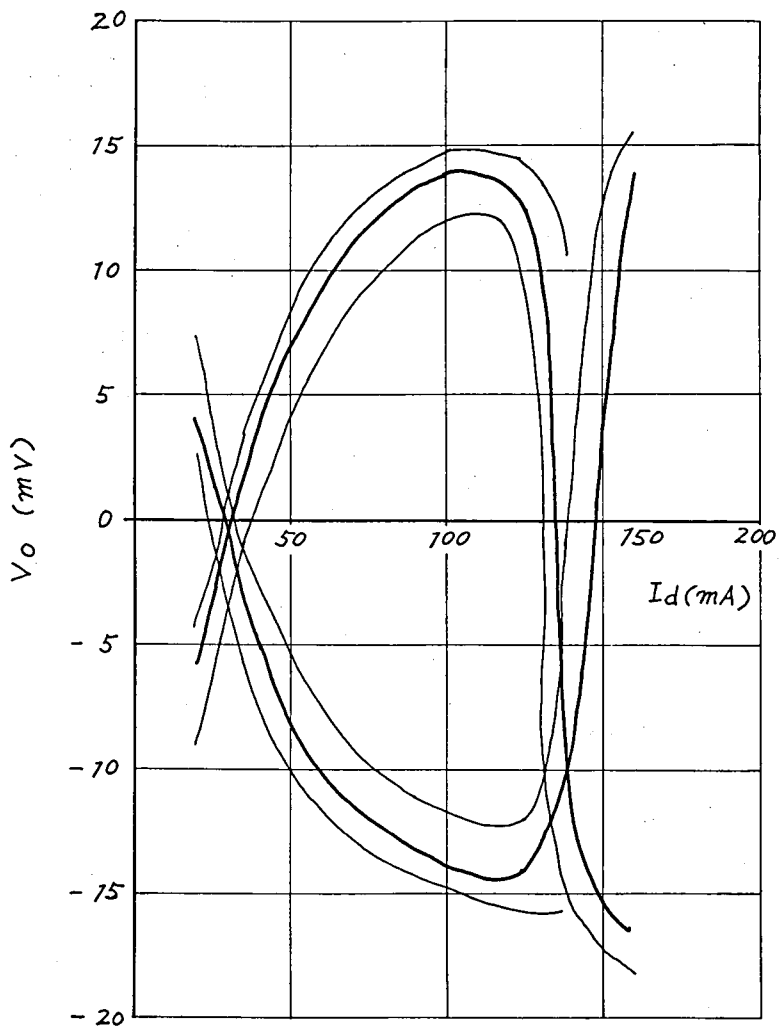


図 3.2 0 (a) 磁性線 # 0 5 の $I_d - V_o$ 曲線

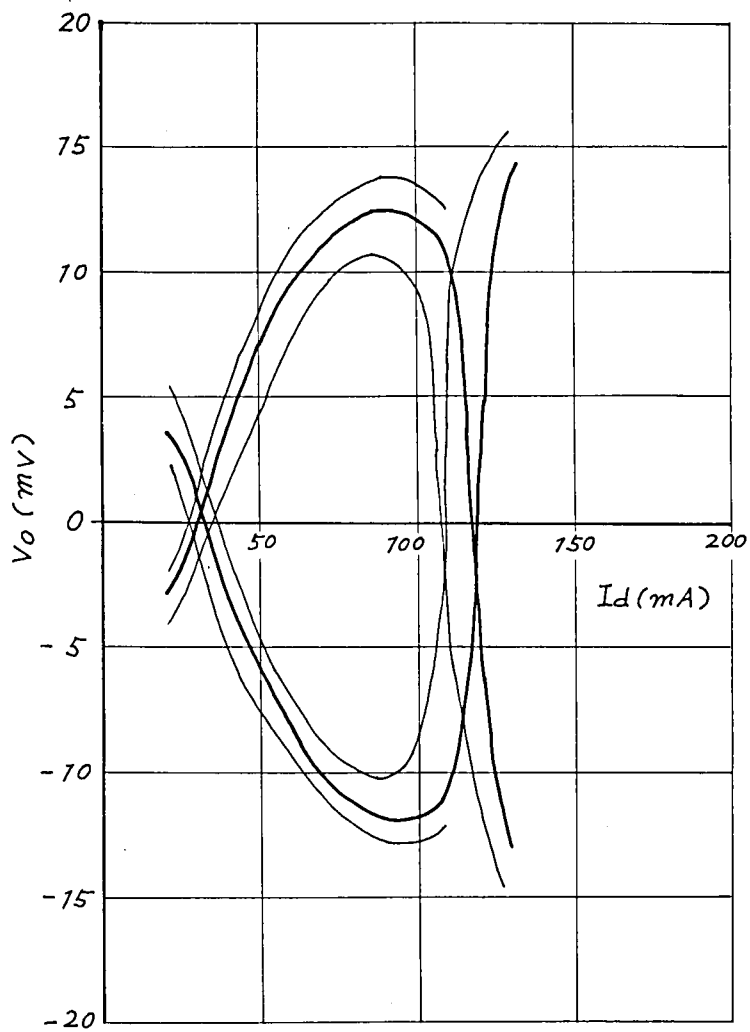


図 3.2 0 (b) 磁性線ケーブル井 0 5 の $I_d - V_o$ 曲線

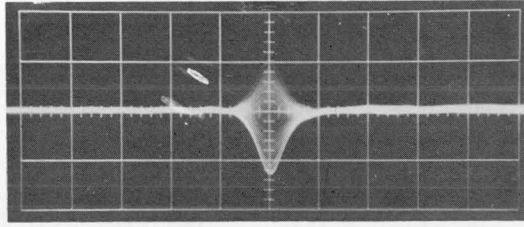


図 3.2 1 記憶情報が妨害をうけて反転する付近の桁電流
における読出し電圧波形
(50 ns/HORIZ. DIV., 6 mv/VERT. DIV.)

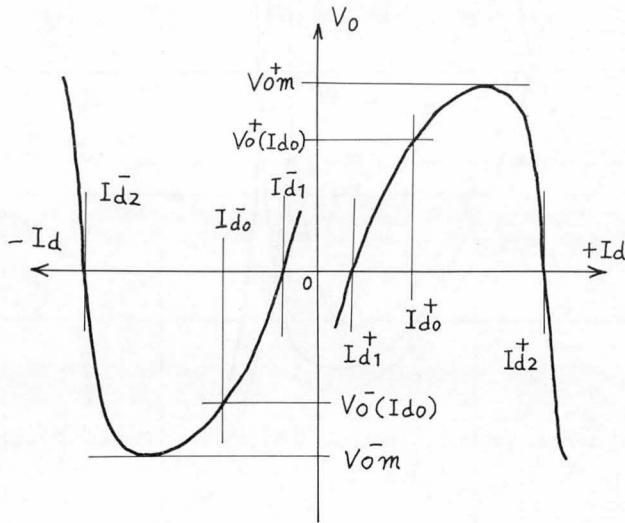


図 3.2 2 $I_d - V_o$ 特性の測定

$$V_o(I_{d0}) = (|V_o^+(I_{d0})| + |V_o^-(I_{d0})|) / 2$$

を定義する。

$I_{d1}, I_{d2}, V_{om}, V_o(I_{d0})$ のそれぞれ正、負における分布の様子の一例を、磁性線 # 02 について、図 3.2 3, 図 3.2 4, 図 3.2 5, 図 3.2 6 に正規確率紙表示で示した。他の磁性線ロットについてもほぼ正規分布とみなしうるデータが得られた。ここで I_{d0} は I_{d1} と I_{d2} のほぼ平均値をとり、磁性線 # 02 について 50 mA, 磁性線 # 04, # 05 に

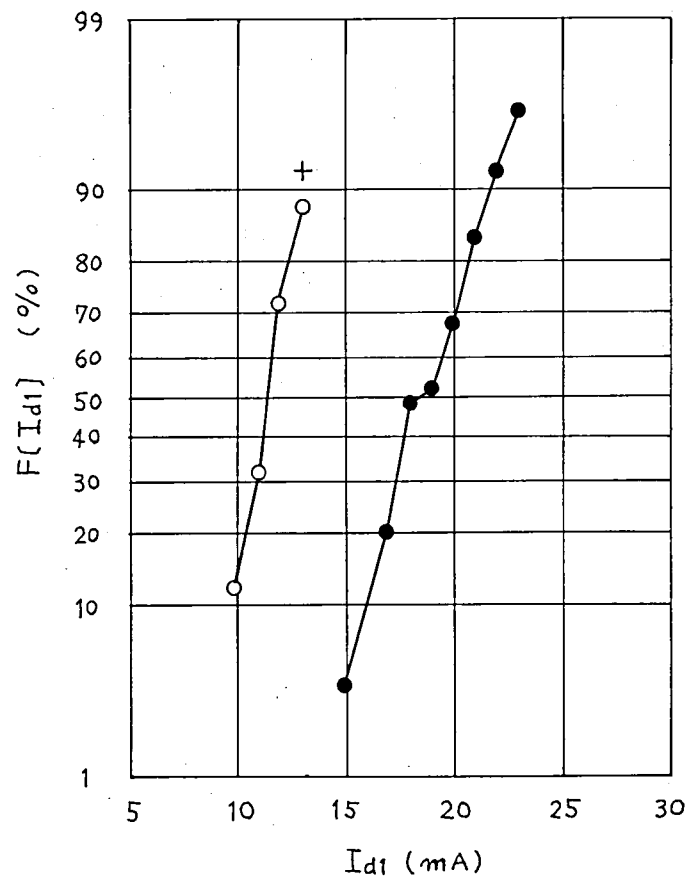


図 3.2.3(a) 磁性線井 02 の I_{d1} 累積分布

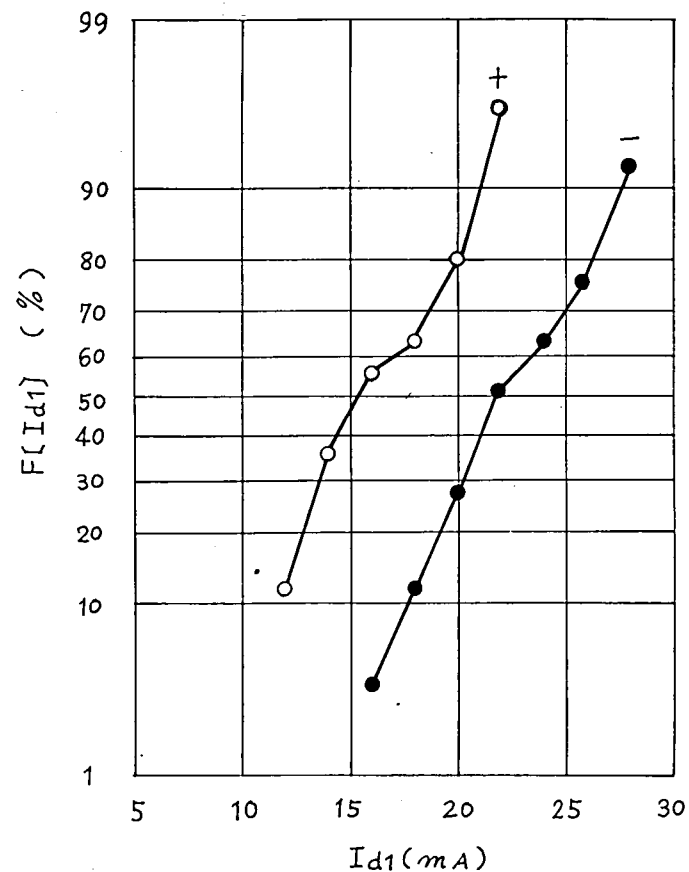


図 3.2.3(b) 磁性線ケーブル井 02 の I_{d1} 累積分布

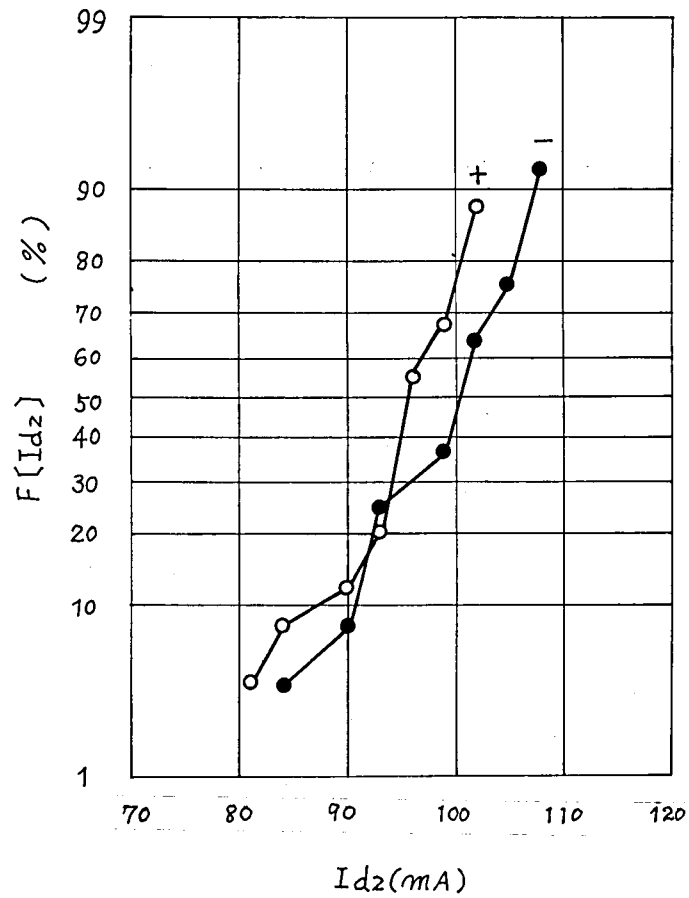


図 3.2 4 (a) 磁性線井 0 2 の I_{d2} 累積分布

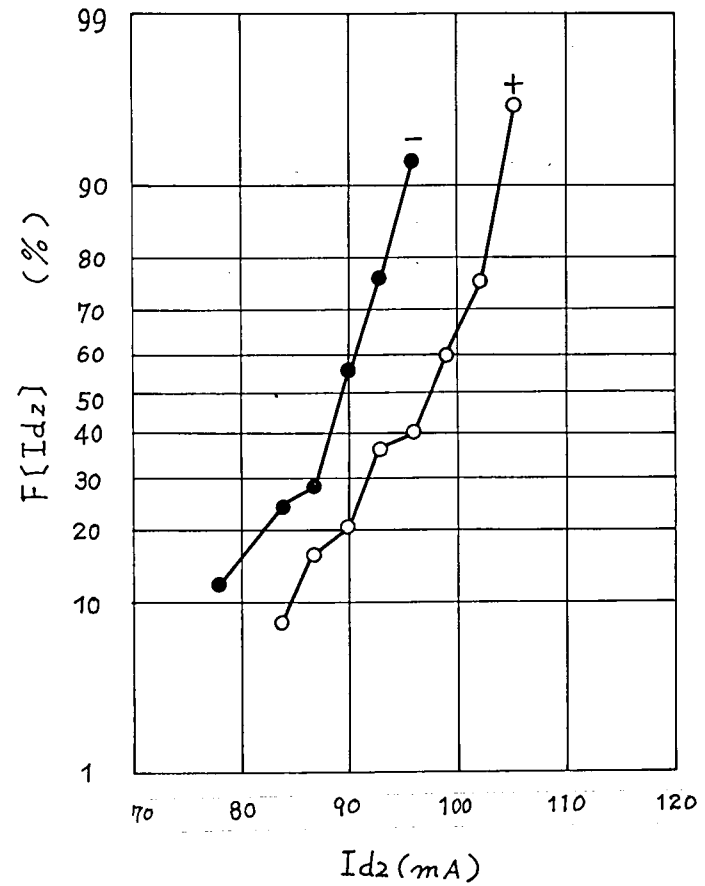


図 3.2 4 (b) 磁性線ケーブル井 0 2 の I_{d2} 累積分布

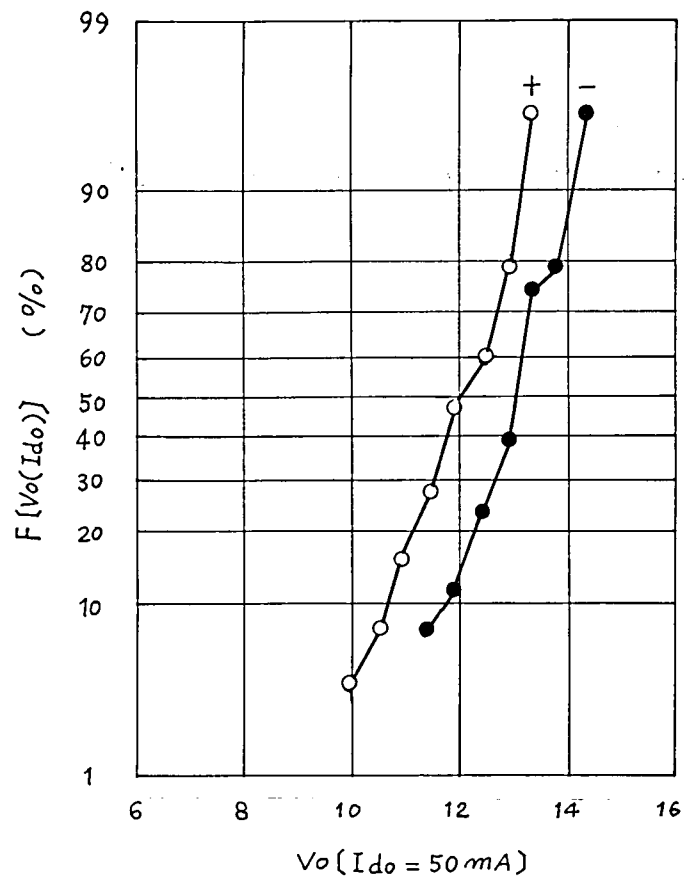


図 3.2 5(a) 磁性線井 0 2 の $V_0(I_{d0})$ 累積分布

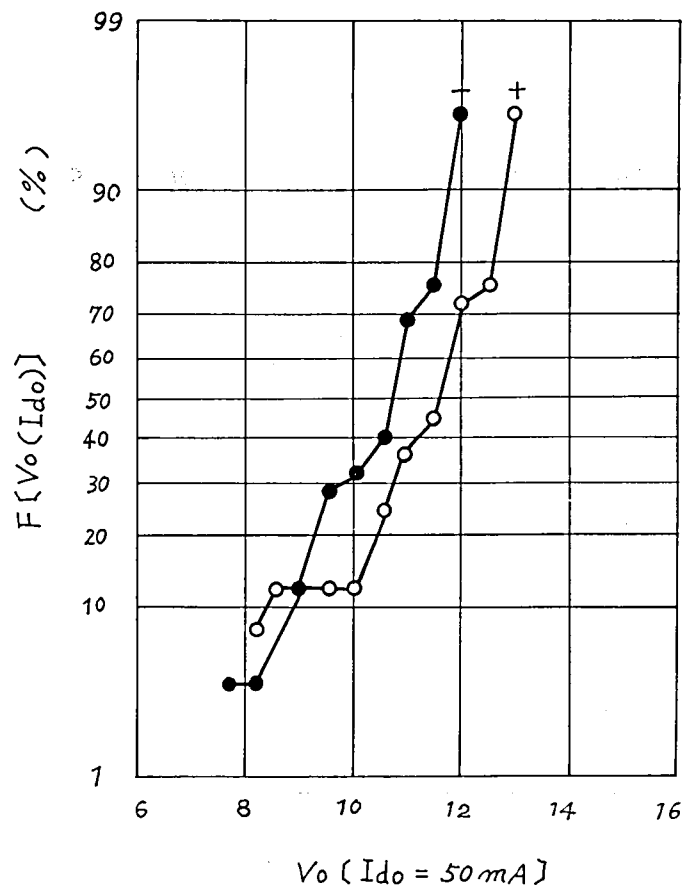


図 3.2 5(b) 磁性線ケーブル井 0 2 の $V_0(I_{d0})$ 累積分布

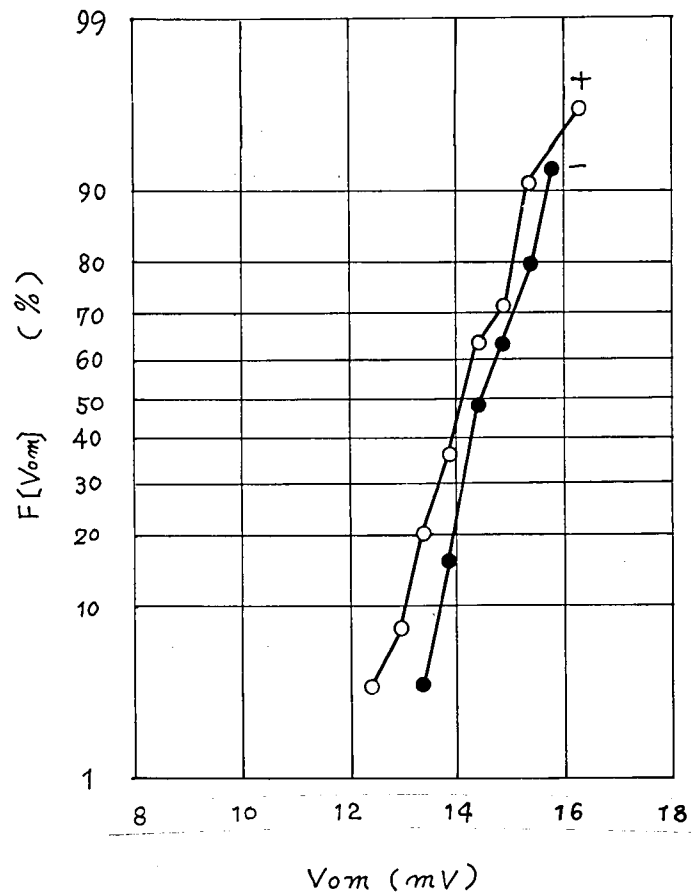


図 3.2.6(a) 磁性線井 02 の V_{om} 累積分布

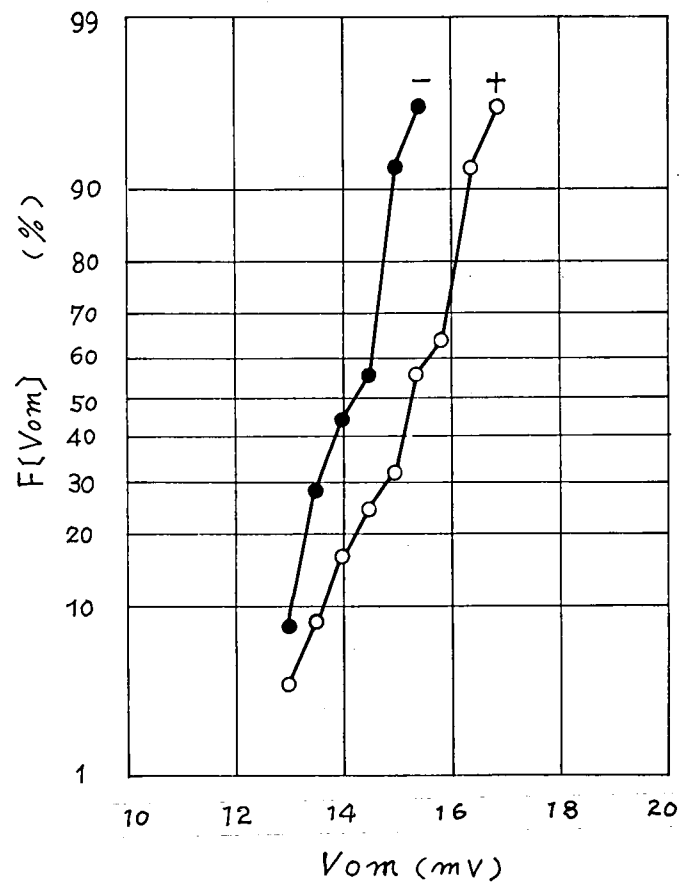
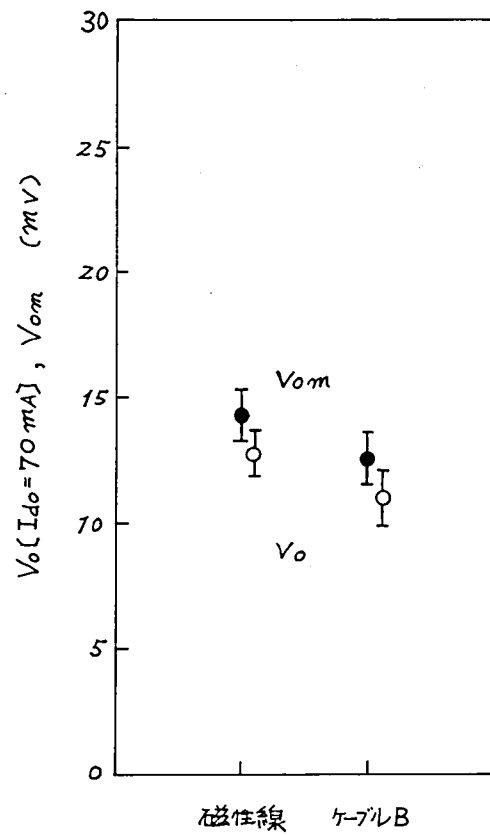
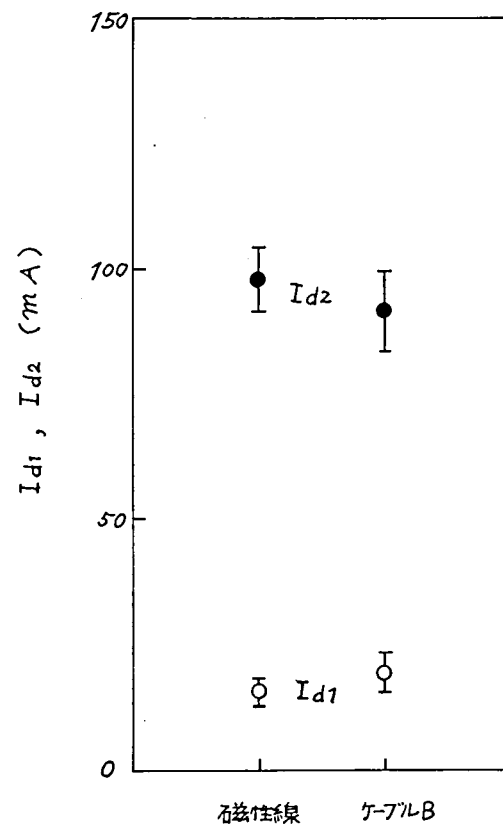


図 3.2.6(b) 磁性線ケーブル井 02 の V_{om} 累積分布



(a)



(b)

図 3. 2 7 磁性線井 0 2 の記憶特性

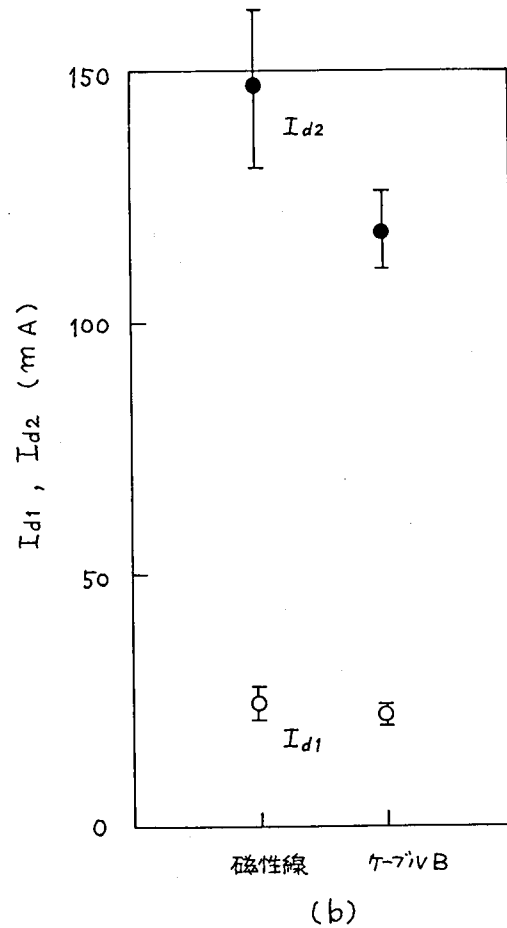
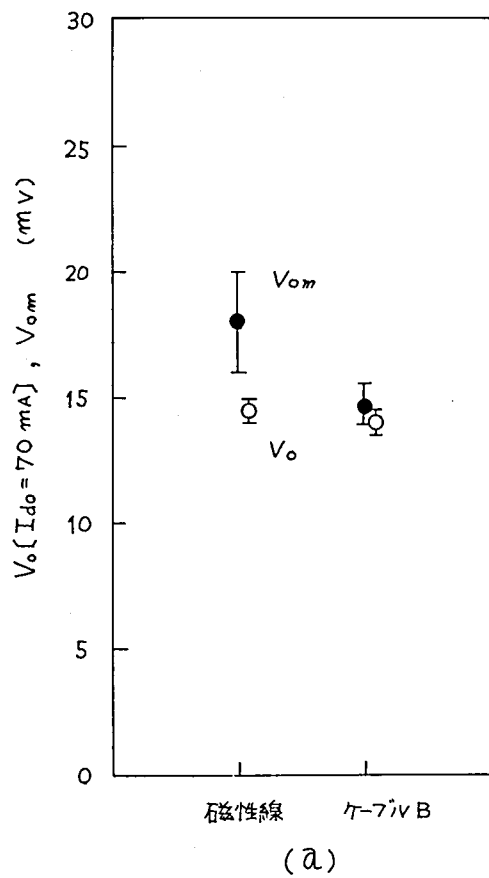
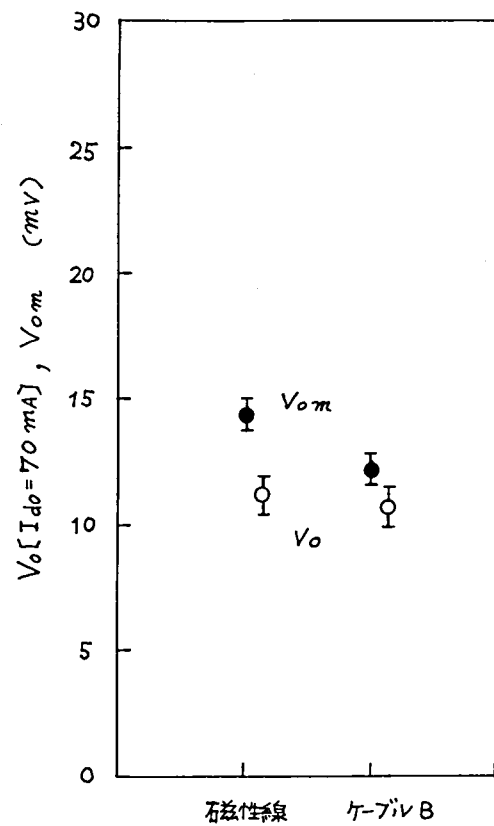
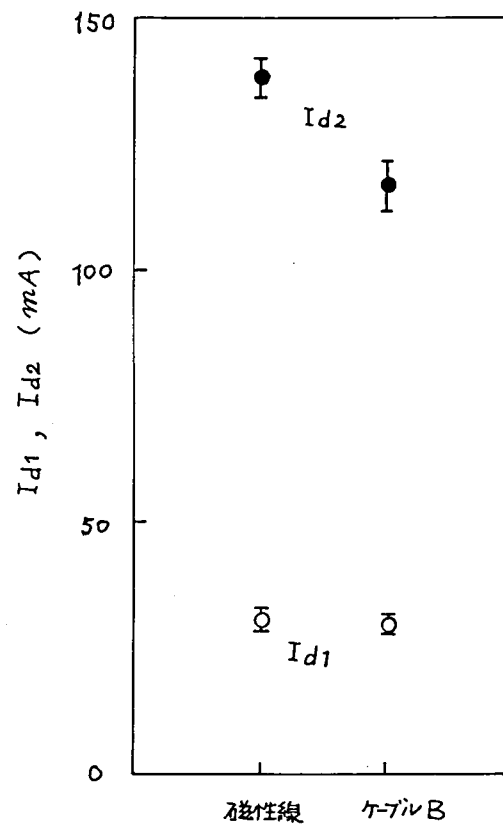


図 3. 2 8 磁性線井 0 4 の記憶特性

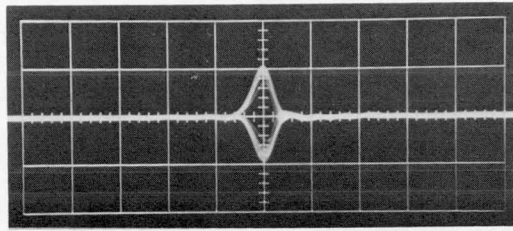


(a)

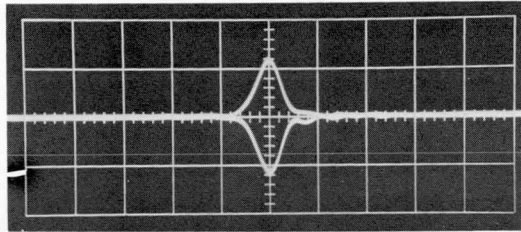


(b)

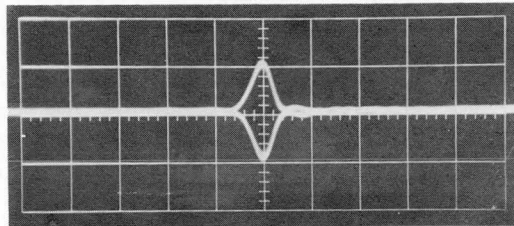
図 3.2.9 磁性線 # 05 の記憶特性



(a) 磁性線ケーブル # 02 , $I_{d0} = 50 \text{ mA}$



(b) 磁性線ケーブル # 04 , $I_{d0} = 70 \text{ mA}$



(c) 磁性線ケーブル # 05 , $I_{d0} = 70 \text{ mA}$

図 3.30 全測定ビットを走査したときの読出し電圧波形

($50 \text{ ns/HORIZ. DIV.}$, 12 mV/VERT. DIV.)

* I_{d1} , I_{d2} についてのこの傾向は、図 3.10 のそれと逆であって、磁気ひずみがやや負である磁性線に高分子材料の収縮にともなう圧縮応力が加わっているものと考えられる。

ついて 70 mA とした。

各磁性線ロットについての、磁性線単体および磁性線ケーブルにおける、 I_{d1} , I_{d2} , V_{om} , $V_o(I_{d0})$ の平均値 \bar{x} と標準偏差 σ のまとめを図 3.27, 図 3.28, 図 3.29 にそれぞれ示した。また図 3.30 は $V_o(I_{d0})$ の観測波形である。

磁性線単体試料と磁性線ケーブル試料とは同一磁性線ではないので、数十 m にわたる磁性線長さ方向の特性偏移を考慮しなければならないが、全体として、 I_{d1} , $V_o(I_{d0})$ の変化はほとんどなく、 I_{d2} , V_{om} は少し減少している。^{*} いずれにしても充分な動作範囲があり、特性的には 実際的には支障はない。

以上の検討結果から、磁性線のフラット・ケーブル化にあたっては成形条件 B が適切であり、この条件で成形した磁性線ケーブルの記憶特性に問題がないことを結論した。

3.2.5 巻取りリール径による記憶特性の変化

成形を完了した磁性線ケーブルは巻取りリールに巻取られるが、このリール径の大きさが記憶特性に及ぼす影響を実験的に検討した。

磁性線ケーブルを順次直径 $2R = 200\text{ mm}$, 83 mm , 52 mm の円筒にかたく巻きつけたまゝ常温で 250 時間放置した後で、たゞちに 3.2.4 におけると同じ測定を行なった。測定結果の一例を図 3.31 に示す。

直径 50 mm 程度のリールでは、読出し電圧の低下と桁電流動作範囲の減少で特徴づけられる記憶特性の変化が生じた。円筒に巻きつけられたあと平面上におかれた状態で磁性線^{**}の軸方向に圧縮応力が加わるものと推定される。つたようにみえ

以上の検討の結果から直径 100 mm 以下では問題があると考えられるので、直径 200 mm 程度の巻取りリールを使用することを結論した。

3.2.6 温度特性の検討

図 3.4 に示したように、磁性線のテープ・ケーブル化によって、記憶平面の構造は端子を設けた印刷配線基板上へのテープ・ケーブル状記憶布線のはり合わせからなるように単純化される。

この場合に熱膨張係数を異にする構成材料の積層からなる構造が、温度サイクルによってはく離や変形を生じ、これらにもとづく記憶特性の劣化が発生しないかを検討しておく必要がある。

** に曲げ応力が加わり、円周方向合金成分比変動と重なって、見かけ上磁性線

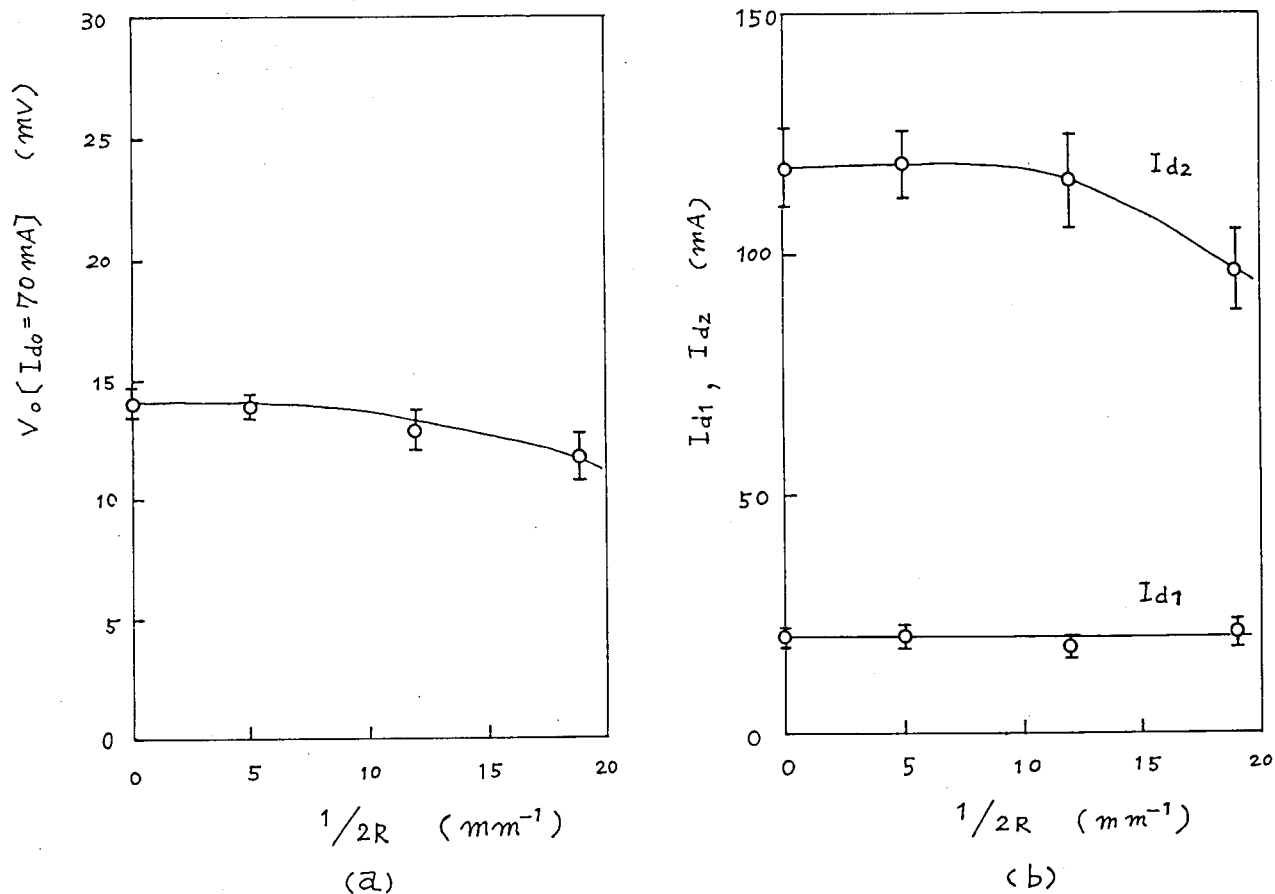


図 3.3.1 リール巻付けによる磁性線ケーブル記憶特性の変化
(磁性線 # 0.4, ケーブル成形条件 B)

温度特性検討のために試作した記憶平面の外観を図 3.32 に示す。語線は図 3.17 に示した 2 ターン構成とし、図 3.33 に示すように 50μ 厚の工業用両面接着テープ（住友スリーエム社、 A6465 ）によって $300 \times 300\text{mm}$ の大きさの片面銅箔ガラス・エポキシ樹脂積層板上に積層する構造とした。磁性線ケーブルは成形条件 B によるものとし、記憶平面中央部の互いに隣接する 3 ビットを測定対象とした。

測定回路および測定パルス系列は、図 3.15 および図 3.8、図 3.9 に示したものと同一であるが、恒温槽の記憶平面磁性線対からの出力は 2 本の 75Ω 同軸ケーブル約 3 m で引き出し、差動変成器二次側の終端抵抗を 100Ω として同軸ケーブルの特性インピーダンスと整合した。また語電流パルスの振幅は 700mA （立上り時間 $t_r = 50\text{ns}$ ）とした

試験した温度サイクルのダイアグラムを図 3.34 に示す。時間-温度曲線の平坦部において 9 点の測定を実施し、測定は規定温度到達後 45 分経過して充分槽内が平衡に達して

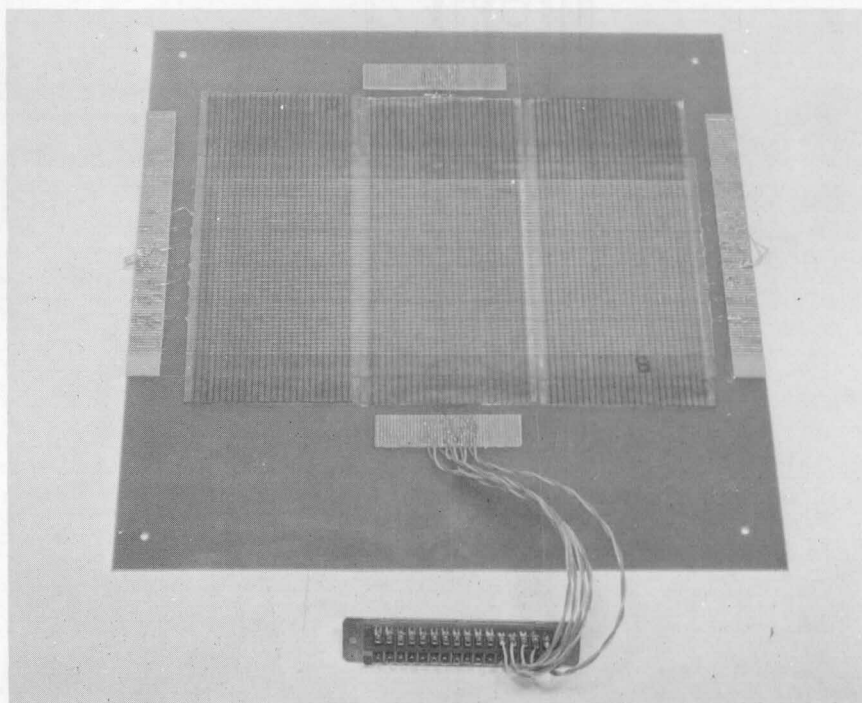


図 3.32 温度試験用に試作した磁性線
ケーブル記憶平面

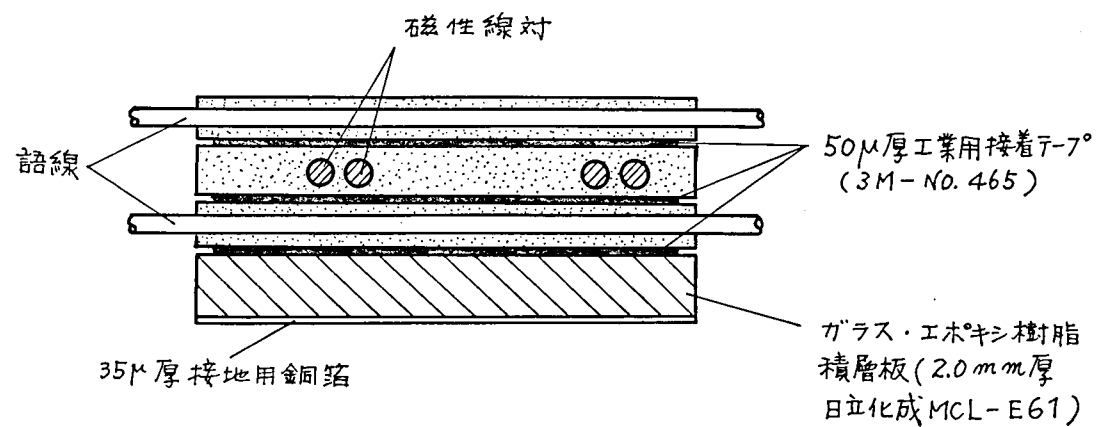


図 3. 3 3 試作記憶平面の断面

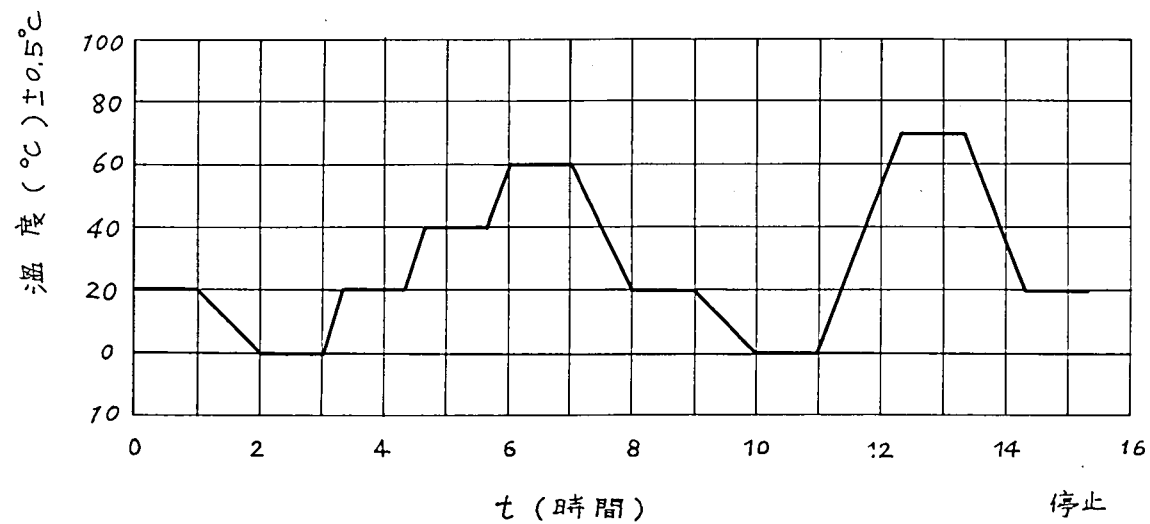


図 3. 3 4 温度サイクルのダイアグラム

から開始した。

温度サイクルの始点と終点における記憶特性の一例を図3.35に示した。各測定ビットとも良い再現性を示し、記憶特性とあわせて、温度サイクル終了後の記憶平面は目視検査の結果何らの変形も認められなかった。

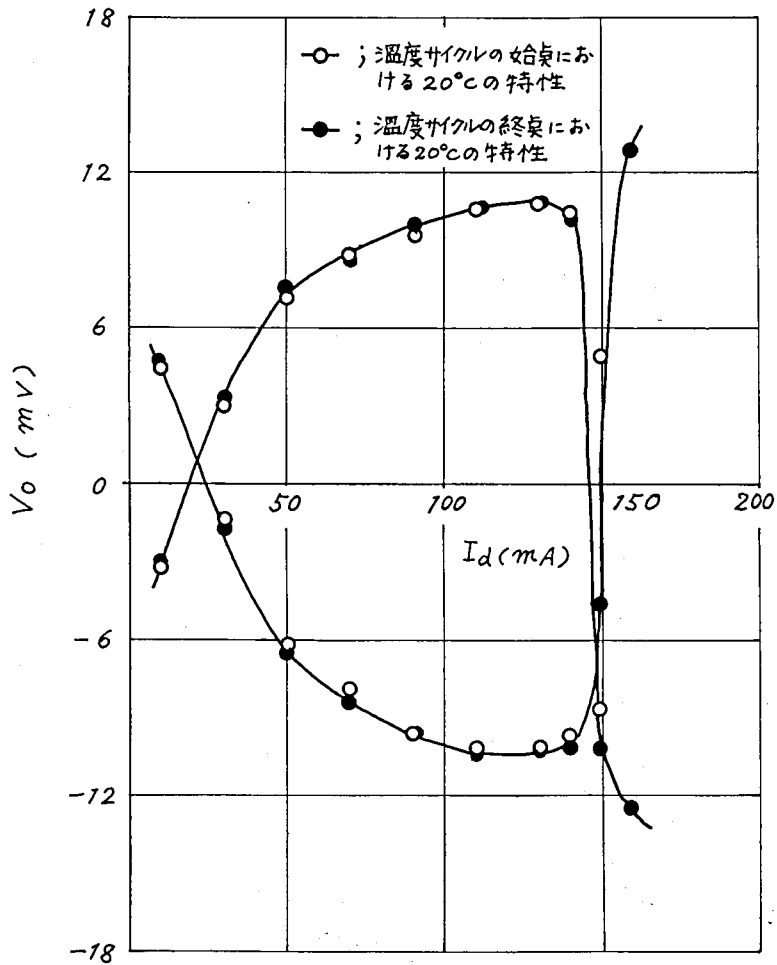


図 3.35 磁性線ケーブル記憶平面特性の再現性

(磁性線井 0.4, 0 番地)

図 3.36 は記憶特性曲線の温度変化を示す一例である。桁電流動作点 I_{d0} をパラメータとする読出し電圧 $V_0(I_{d0})$ の温度 T に対する推移を図 3.37 に示した。

磁性線ケーブルからの読出し電圧 V_0 の平均温度勾配 $\Delta V/\Delta T$ は

$$\Delta V/\Delta T = 0.031 \text{ mV}/^\circ\text{C}$$

20℃における読出し電圧 $V_0(T_{20})$ に対する温度係数は

$$\frac{V_0(T_{20} + \Delta T) - V_0(T_{20} - \Delta T)}{V_0(T_{20}) \times 2 \Delta T} \times 100 = 0.36 \text{ } \%/^\circ\text{C}$$

であった。

磁性線単体について同様の測定を行なった結果は図 3.38 に示す通りであり

$$\Delta V/\Delta T = 0.034 \text{ mV}/^\circ\text{C},$$

$$\frac{V_0(T_{20} + \Delta T) - V_0(T_{20} - \Delta T)}{V_0(T_{20}) \times 2 \Delta T} \times 100 = 0.39 \text{ } \%/^\circ\text{C}$$

であった。

以上の結果から、試作記憶平面における記憶特性の温度推移は磁性線単体におけるものとほぼ同一とみなすことができ、構成材料の熱的変形にもとづく記憶特性の変化は無視できるものと結論される。

温度変化に対する図 3.36 の特性推移は、熱エネルギーによって磁化の方向性配列が乱され、異方性磁界と保持力が低下することから定性的に説明しうる。

3.2.7 本章の概要

テープ・ケーブルの基本構造について述べ、本研究において用いたケーブル成形機の構成において磁性線のテープ・ケーブル化のため考慮した事項と製造工程のあらましについて説明した。

つぎに磁性線ケーブルの試作にあたって選定した構成材料、形状寸法、磁性線配列について述べ、成形過程中において磁性線がうける応力に対する記憶特性について予備的に実験を行ない、3通りの成形条件を設定した。

成形条件によるケーブル形状の検討結果から条件 B が適切であることを示し、ケーブル成形による磁性線の記憶特性変化は実用上問題がないことを結論した。

さらに磁性線ケーブルの巻取りリール径について実験を行ない、100mm以上の直径で

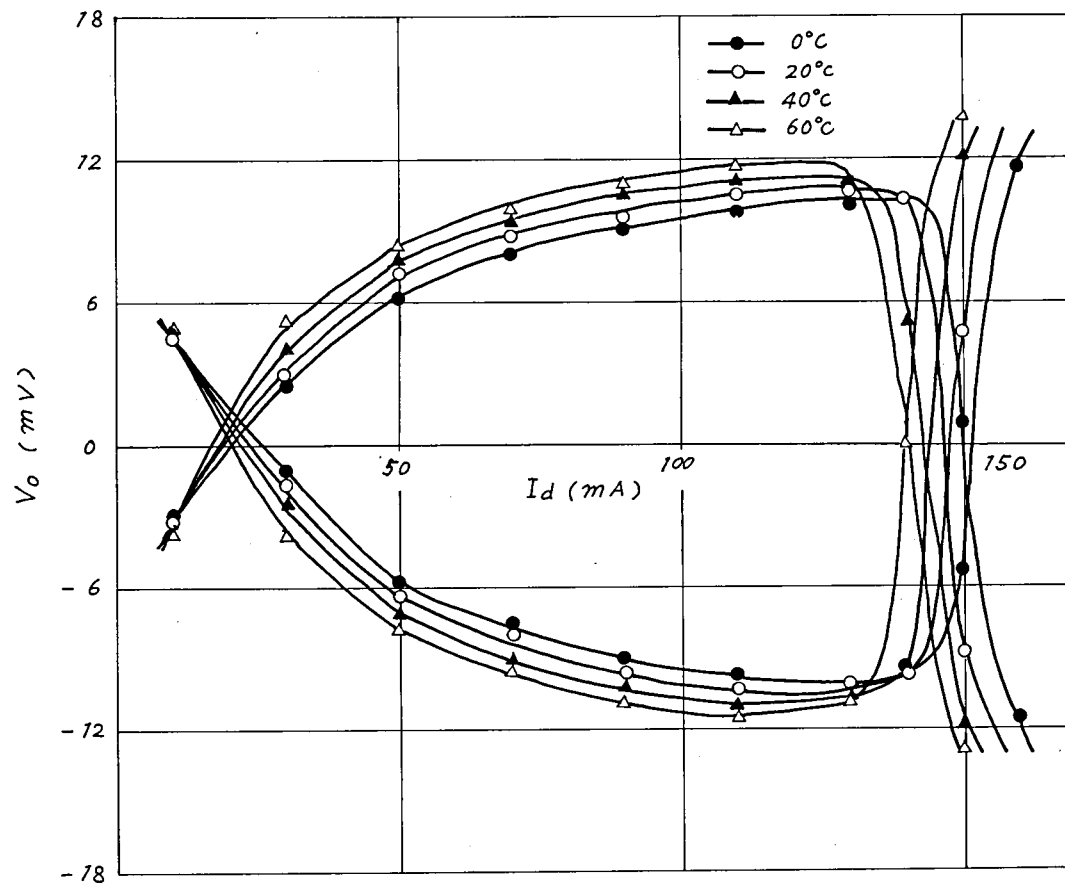


図 3.3 6 磁性線ケーブル記憶平面の温度特性

(磁性線 # 0 4, 0 番地)

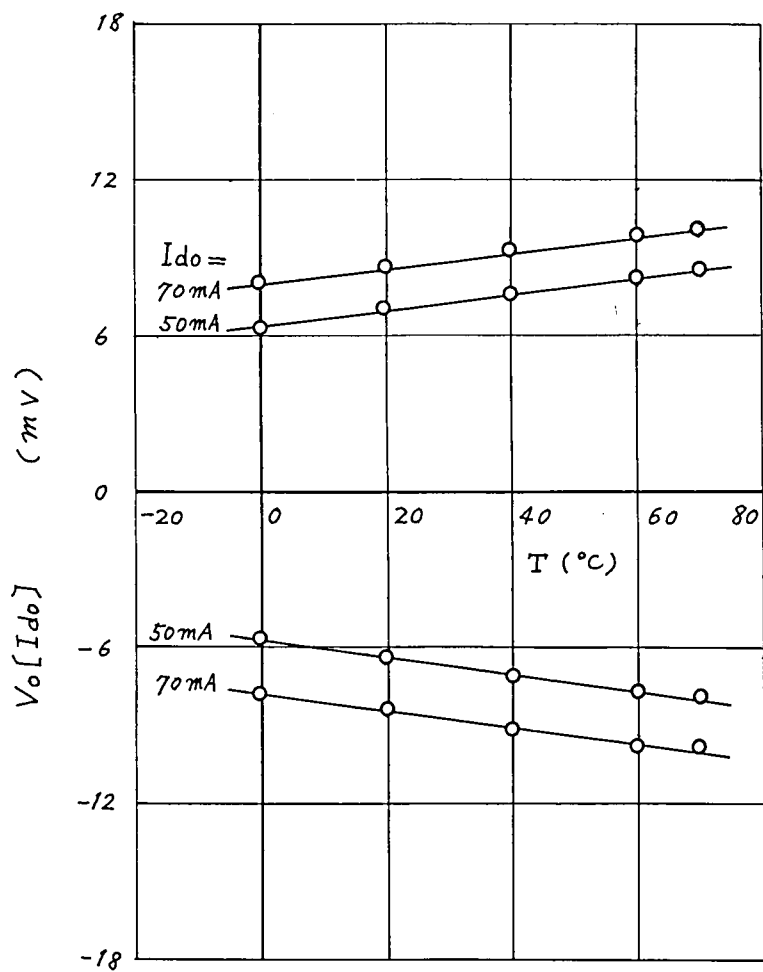


図 3.37 磁性線ケーブル記憶平面読出し電圧の温度特性

(磁性線井 04, 0番地)

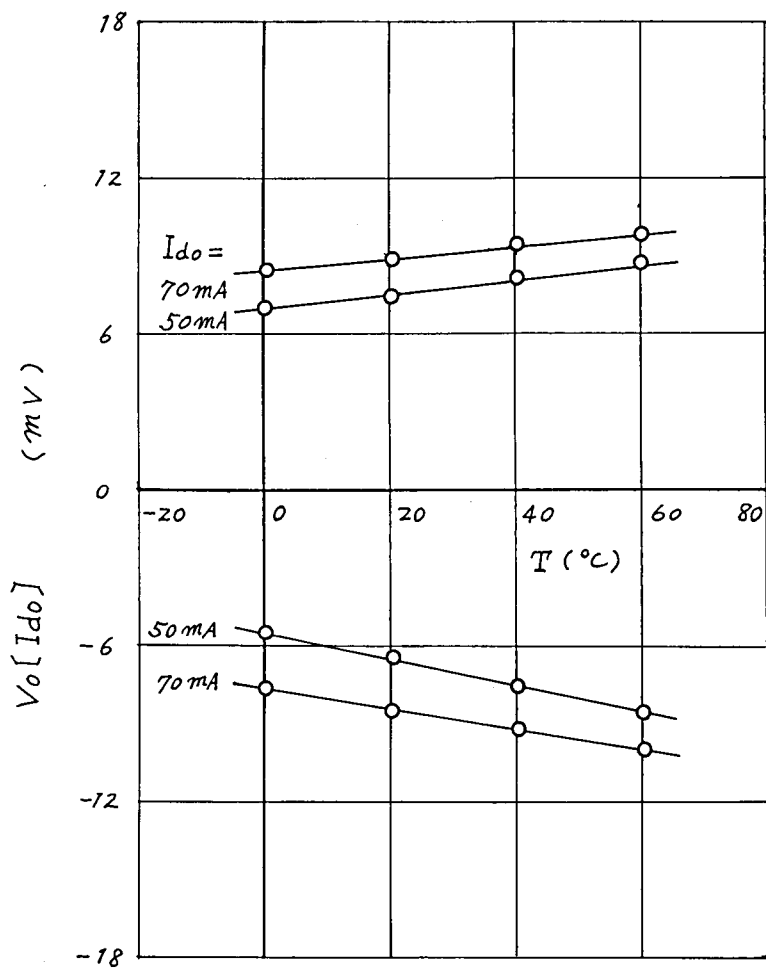


図 3.38 磁性線の読出し電圧温度特性

(磁性線井 04, 0番地)

は記憶特性に対する影響がほとんどないことを明らかにした。

最後に、磁性線ケーブルと語線ケーブルとの積層からなる記憶平面の温度サイクル試験を行ない、 0°C から 70°C の周囲温度において妨害読出し電圧の温度係数が磁性線単体のそれと比較して差がないことを示した。

以上の検討によって磁性線のテープ・ケーブル化が可能であり、特性的にも実用しうるとの結論を得た。

3.3 磁性線ケーブル記憶スタックの設計

3.3.1 設計の基本方針

磁性線ケーブルを用いて記憶スタックを設計、試作し、実装にあたっての問題点を検討するために、電子交換機用を目的とする次の設計方針を定めた。

- 1) 信頼性に重点をおいて安定な動作が得られることを第一とし、高速化、小型化については二義的とする。
- 2) フラット・ケーブル化した磁性線および語線のはり合わせからなる積層構造とし、組立工程の単純化、経済化をはかる。
- 3) 記憶容量は 1×10^5 ビット規模とし、2,048語、語長50ビット、計102,400ビットとする。
- 4) 動作速度は3.1.4で述べた要求の2倍、サイクル時間 $1\mu\text{s}$ を目標とする。
- 5) 高速動作においても良好な信号対雑音比が得られるよう、2交点／ビット方式とし、語線配列間隔はビット間相互干渉がいちじるしくない範囲にとどめる。
- 6) 動作周囲温度は $0^{\circ}\text{C} \sim 50^{\circ}\text{C}$ とする。

3.3.2 語線構造の検討

具体的な語線構造を決定するにあたって、次の前提条件をおくことにした。

- 1) 立上り時間 50ns 以下の高速・大電流パルスを供給しうる半導体素子に対する要求を緩和するために語線は2ターンとして、語電流値を 1A 以下に下げる。
- 2) 語線用線材としては長方形断面をもつもの、円形断面をもつものなどが考えられるが、端子へのハンダづけ作業性にすぐれている点から円形断面をもつポリウレタン銅

線（ $0.1\text{ mm } \phi$ ）をテープ・ケーブル化して使用する。

語線の配列寸法として、図3.39に示す、対をなす導線間隔 s ，語線間隔 p ，高さ h をきめるにあたっては、磁性線の軸方向に沿う実効語駆動磁界が

1) 語線と磁性線との交点部分においては、振幅が大きく、平坦な分布をもち、その平坦部分の軸方向距離が $\pm p/2$ 以内で長いこと。

2) 隣接ビット位置における分布の振幅が微少であること、

の条件を満足しなければならない。

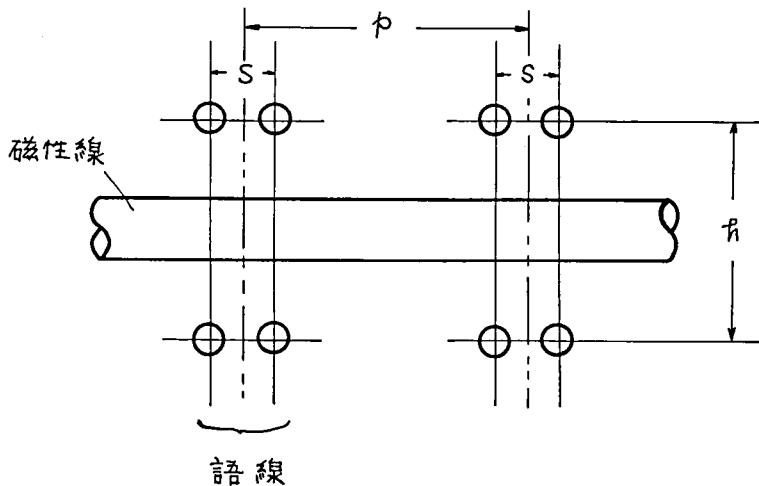


図 3.39 語線の配列

円周方向に容易軸をもつ円筒状磁性薄膜の困難軸方向に加わると、軸方向に回転する磁化によって減磁力が発生する。実効磁界の大きさは外部磁界と減磁力との合成によってきまるが、減磁力は実効磁界に依存しており、かつ非線形な関係にあるので、理論的に解を得ることが困難であり、近似的な取扱いを工夫しても実験値との対応性が得がたい⁽⁶⁷⁾。したがって実験的検討によって配列寸法を決定することとした。

図3.39における h が小さいほど、磁界分布、振幅ともに有利であることは明らかである。磁性線ケーブルの厚みを 0.27 mm ，語線ケーブルの被覆厚みを $15\text{ }\mu$ ，接着剤厚みを $50\text{ }\mu$ として、 $h = 0.5\text{ mm}$ をもって以下の検討を進めることとした。

測定は、C社製磁性線（ $0.2\text{ mm } \phi$ ，パーマロイ膜厚 $0.8\text{ }\mu$ ）を用い、図3.40に示すパルス系列によった。クリア桁電流 $I_c = 200\text{ mA}$ ，パルス幅 500 ns ，語電流 $I_w = 600\text{ mA}$ ，語電流の立上り時間 $t_r(I_w) = 50\text{ ns}$ ，パルス幅 300 ns ，桁電流パルス幅 250 ns ，語電流パルスと桁電流パルスの重なり時間 100 ns とした。測定値は5ビ

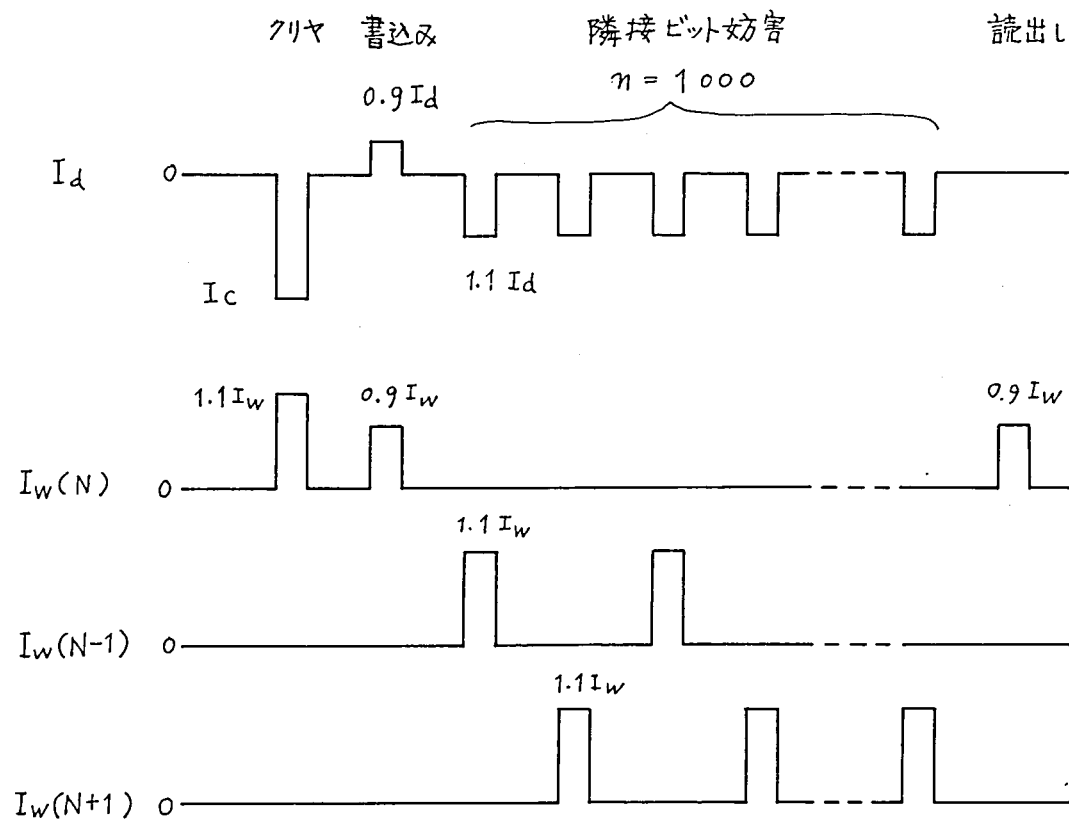
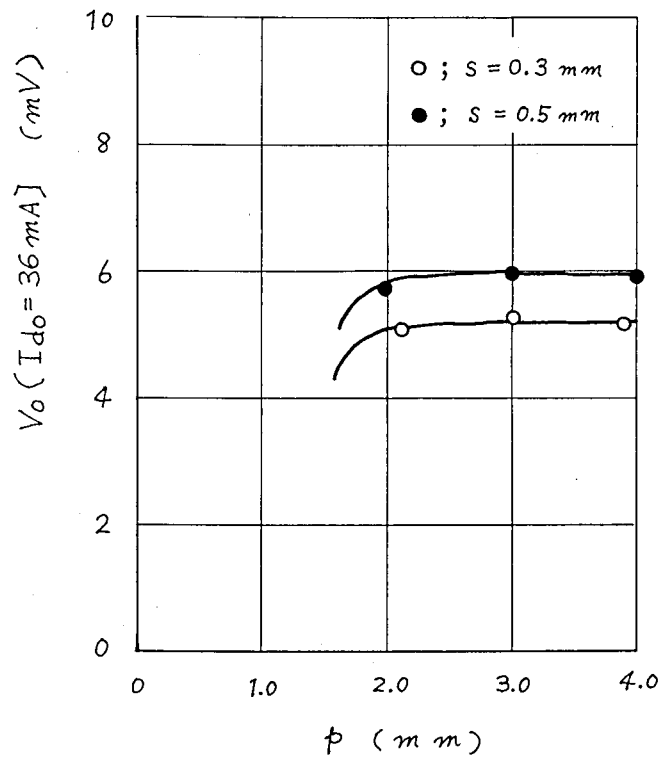
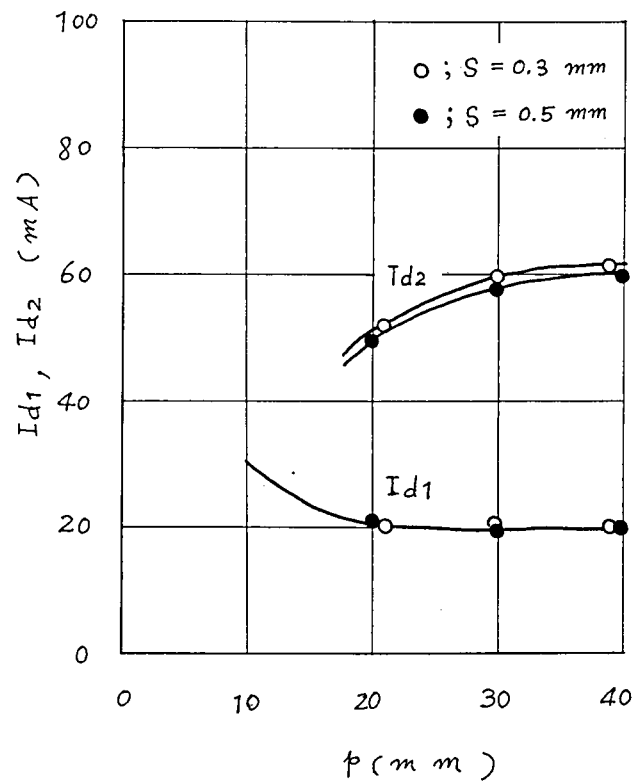


図 3.40 測定パルス系列



(a)



(b)

図 3.4 1 語線間隔 p に対する記憶特性変化 ($h = 0.5$ mm)

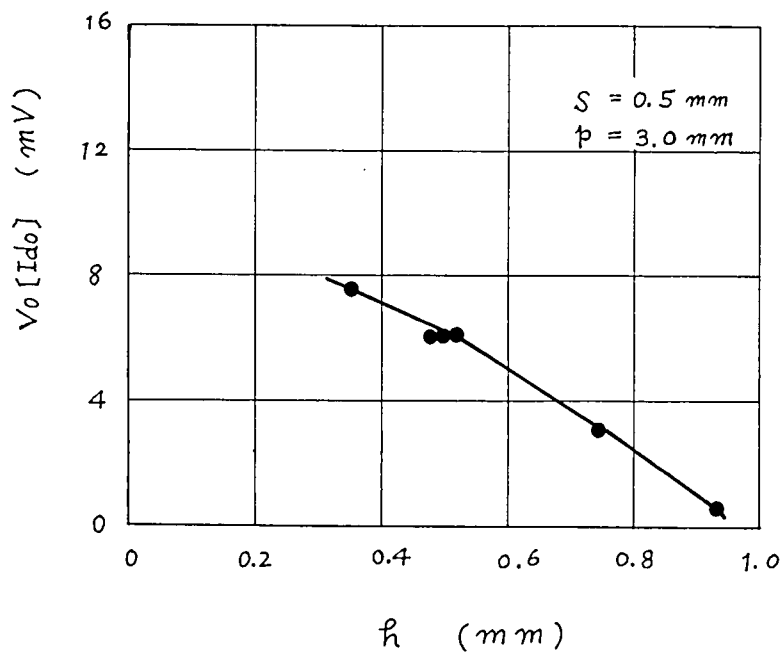


図 3.4.2 h に対する読出し電圧の変化 ($I_{D0} = 3.6 \text{ mA}$)

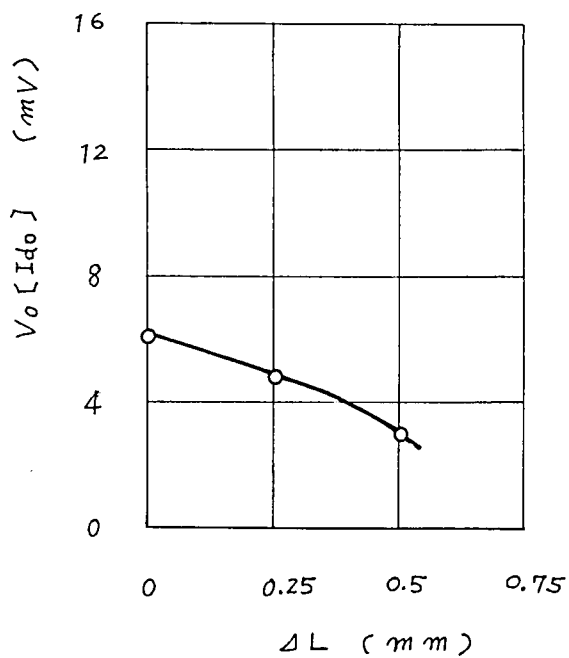


図 3.4.3 上, 下語線のずれ ΔL に対する読出し電圧の変化
 ($I_{D0} = 3.6 \text{ mA}$, $h = 0.5 \text{ mm}$, $s = 0.5 \text{ mm}$, $p = 3.0 \text{ mm}$)

ットの平均をとることとした。

図 3.4 1 は、 s をパラメータ、 p を変数として、 I_{d1} 、 I_{d2} 、 $V_o(I_{d0}=3.6\text{mA})$ をプロットしたものである。

この結果から $s = 0.5\text{mm}$ 、 $p = 3\text{mm}$ を採用することとした。

組立精度からくる読出し電圧のばらつきを知るために、 h の変動に対するデータを図 3.4 2 に示す。 $h = 0.5\text{mm}$ の近傍では、 $\partial V_o(I_{d0})/\partial h \simeq -0.17\%/ \mu$ 程度であり、 $\pm 5\%$ の読出し電圧変動におさえるには $\pm 30\mu$ のばらつき内に h をおさえる必要がある。

図 3.4 3 は、往復して上下に配置してある語線が $4L$ だけ磁性線の軸方向にずれたときの読出し電圧の変動

である。 $4L = 0$ 近傍では $\partial V_o(I_{d0})/\partial(4L) \simeq 0.08\%/ \mu$ 程度であり、読出し電圧の 5% 変化に対しては $4L \leq \pm 63\mu$ 程度が必要である。

磁性線と語線との直交性がくずれたときの読出し電圧変動は、図 3.4 4 に示すように、 $\pm 1^\circ$ 程度では認められなかった。

3.3.3 語線の逆起電圧

語線の逆起電圧は、番地選択回路および語駆動回路の半導体素子の逆耐電圧と関連して

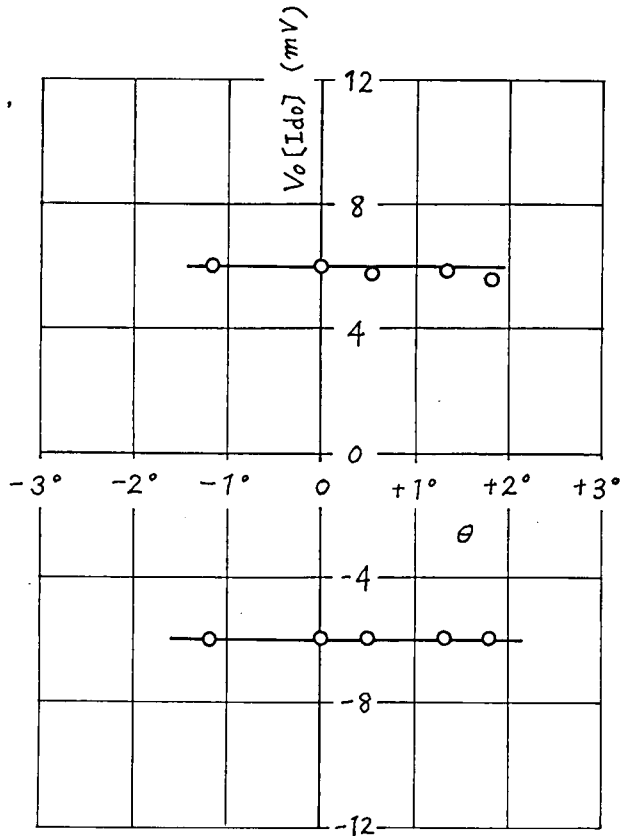


図 3.4 4 語線と磁性線との直交くずれによる読出し電圧変化

($I_{d0} = 3.6\text{mA}$, $h = 0.5\text{mm}$,
 $s = 0.5\text{mm}$, $p = 3.0\text{mm}$)

重要なパラメータである。

まず図 3.4.5 に示す寸法をもつ 2 ターン語線のインダクタンスを計算する。語線は 2.1.2 で述べたように困難軸方向磁界に対して非線形な μ をもつ磁性線群と結合しているので、ここでは磁性線が存在しないときの語線のインダクタンス L_{w0} と、磁性線の困難軸方向スイッチングにもとづくインダクタンス増加分 ΔL_w との和として、語線の全インダクタンス L_w を考えることにする。

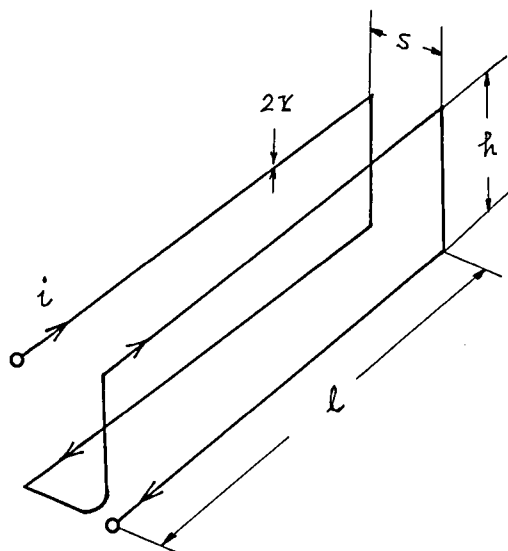


図 3.4.5 2 ターン語線

半径 r 、透磁率 μ_0 の円形断面をもつ直線導線の自己インダクタンス L_i は、導線の表面のみにパルス電流が集中して流れているものとして、長さ $\ell \gg r$ のとき

$$L_i = \frac{\mu_0 \ell}{2\pi} \left[\log \left(\frac{2\ell}{r} \right) - 1 \right] \quad (3.4)$$

で与えられる。⁽⁶⁹⁾ また 2 本の平行した直線導線間の相互インダクタンス M_{ij} は

$$M_{ij} = \pm \frac{\mu_0 \ell}{2\pi} \left[\log \left(\frac{2\ell}{R_{ij}} \right) - 1 \right] \quad (3.5)$$

で与えられる。⁽⁶⁹⁾ ここで符号は、導線 i と導線 j の電流が同方向のとき正、異なるとき負をとるものとする。 R_{ij} は幾何学的平均距離であるが、導線 i と導線 j との距離 r_{ij} が $r_{ij} \ll \ell$ であれば、近似的に $R_{ij} = r_{ij}$ となる。したがって

$$L_{w0} = \sum_i L_i + \sum_{i,j} M_{ij} \quad (3.6)$$

から次式が得られる。

$$L_{w0} = \frac{2\mu_0\ell}{\pi} \cdot \log \frac{h\sqrt{1+(h/s)^2}}{r} \quad (3.7)$$

また磁性線のスイッチングにともなうインダクタンス増加分 ΔL_w は、スイッチング磁束量を $\Delta\Phi$ 、回路との鎖交数を N 、スイッチングに要する電流を ΔI として、 $N\Delta\Phi = \Delta L_w \Delta I$ より

$$\Delta L_w = \frac{N \cdot \Delta\Phi}{\Delta I} \quad (3.8)$$

として求められる。

ここで $\Delta\Phi$ は、磁性線の半径を a 、磁性体の膜厚を t 、飽和磁束密度を Φ_s 、磁性線本数を n として

$$\Delta\Phi = n \cdot 2\pi a t \Phi_s \quad (3.9)$$

である。

いま 50 対の磁性線が 2 mm 間隔で配列されているとき、磁性線ケーブルの耳の長さを両端で各 2.0 mm づつとるものとする、 $\ell \simeq 14.0$ mm となる。また $r = 0.05$ mm, $s = 0.5$ mm, $h = 0.5$ mm として

$$L_{w0} = 0.55 \mu H$$

が得られる。つぎに $a = 0.1$ mm, $t = 1 \mu$, $\Phi_s = 1 \text{ wb/m}^2$, $n = 100$ として

$$\Delta L_w = \frac{4\pi \times 10^{-8}}{\Delta I}$$

となるが、ここで ΔI は磁性線の異方性磁界 H_k と語線構造によってきまる電流値である。クリヤした磁性線に真数情報を書込むに必要な語電流振幅は 3.3.2 における検討の際の測定において約 300 mA であり、これをもって ΔI とすると

$$\Delta L_w = 0.42 \mu H$$

となる。したがって

$$\begin{aligned} L_w &= L_{w0} + \Delta L_w \\ &= 0.97 \mu H \end{aligned}$$

が得られる。

語線の逆起電圧 V_B は、語電流 I_w の立上り時間 t_r として近似的に

$$V_B = -\partial(L \cdot I) / \partial t \simeq L \cdot \frac{I_w}{t_r} \quad (3.10)$$

として求めうる。

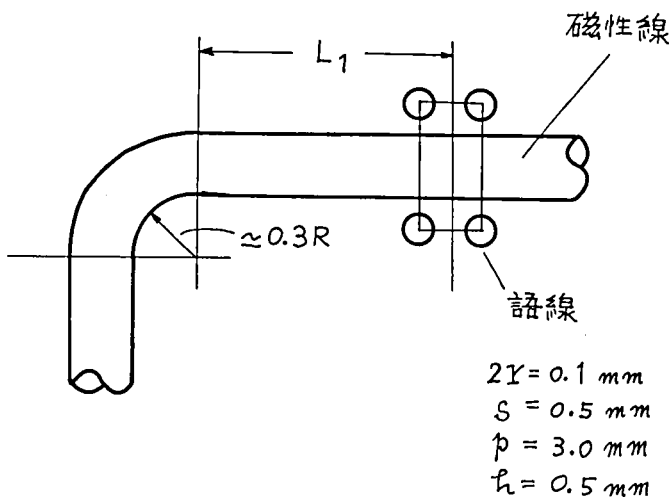
$I_w = 0.6 \text{ A}$, $t_r = 50 \text{ ns}$ として, $V_B = 11.6 \text{ V}$ が計算値である。

実験用に試作した語線線路による測定値では, $L_w = 0.64 \mu\text{H}$ であった。また $I_w = 0.6 \text{ A}$, $t_r = 50 \text{ ns}$ における V_B の測定値は 7.2 V であった。計算値との差は, 式(3.8)において仮定した磁束と語線との鎖交率 100% が, 実際の線路構造ではもれ磁束があって低下していることが一因と考えられる。

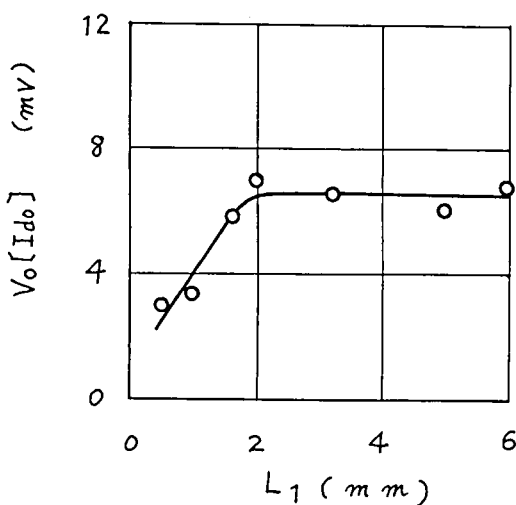
3.3.4 磁性線ケーブルの端末および折返し処理

磁性線ケーブルの端末は, 絶縁材をはがして磁性線を露出させ桁線端子に接続処理されるが, このときに曲げられた磁性線の特性劣化がどの距離まで及ぶかを知ることが機構設計上必要である。

3.3.2 で述べた測定条



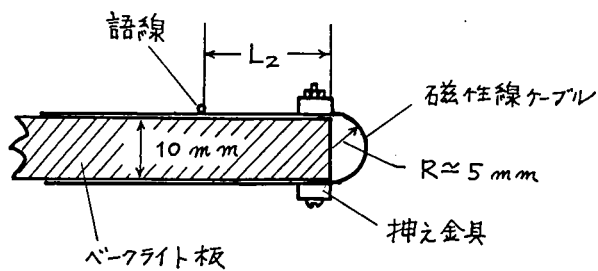
(a)



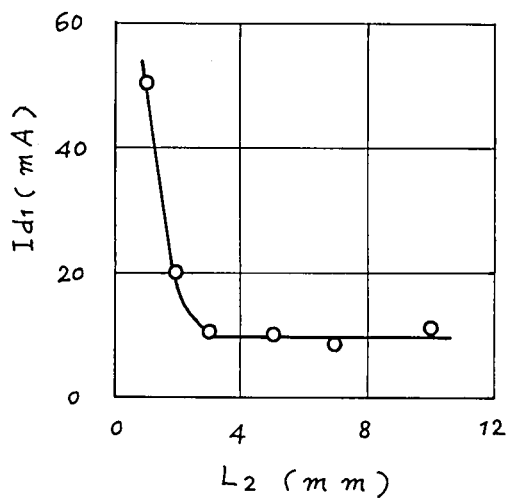
(b)

図 3.4.6 磁性線の折り曲げが読出し電圧に影響する距離

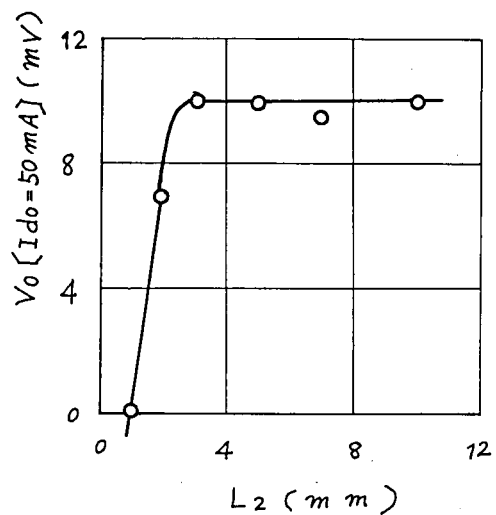
($I_{do} = 3.6 \text{ mA}$)



(a)



(b)



(c)

図 3.4.7 磁性線ケーブルの折り返しによる記憶特性変化

件のもとで、図 3.4.6(a)に示す距離 L_1 を変化させたときの読出し電圧を図 3.4.6(b)にプロットした。隣接ビット妨害は片側語線からだけ加えた。この測定結果から、端部において磁性線ケーブルを基板にクランプするケーブル押えをとりつけ、この押え板の端部から少くとも 3mm 以上の距離をとってから語線を配置することとした。

図 3.4.7(b)および(c)は、磁性線ケーブルを曲率 $R \approx 5 \text{ mm}$ で折返したときの、同図(a)に示す距離 L_2 に対する記憶特性の変化である。ケーブル端部をクランプし、 $L_2 > 3 \text{ mm}$ 以上にとれば、ほとんど問題がないことが明らかとなった。試作記憶スタックの機構設計にあたっては、最小曲率を $R = 10 \text{ mm}$ 以上にとることとして安全をはかった。

3.3.5 磁性線ケーブルの伝送特性

磁性線ケーブル内を伝はんする信号の遅延時間 t_d は、記憶スタックの動作速度をきめる一要素である。また特性インピーダンス、信号減衰率はセンス回路系の設計にとって必要なパラメータである。

図 3.4.8 に断面を示すスタック構造を想定し、接地面上 h の距離に、間隔 s をへだてて存在する往復無限長導線について、無損失線路の仮定のもとに伝送特性を計算してみる。

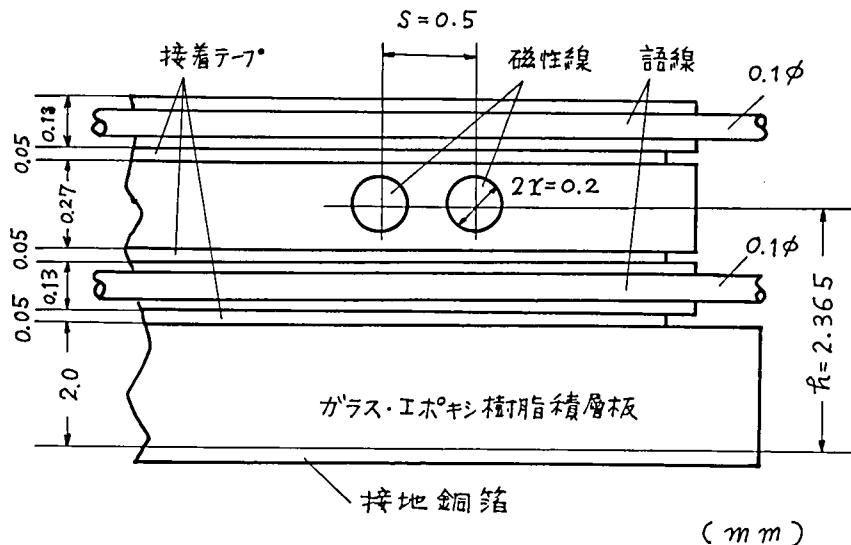


図 3.4.8 記憶スタックの断面

単位長当りのインダクタンス L_d , 静電容量 C_d は近似的に

$$L_d = \frac{\mu}{\pi} \left(\log \frac{2h}{r} - \log \frac{\sqrt{(2h)^2 + s^2}}{s} \right) + \frac{\mu_1}{4\pi} \quad (3.11)$$

$$C_d = \frac{\pi \epsilon}{\log \frac{s + \sqrt{s^2 - 4r^2}}{2r}} \quad (3.12)$$

で与えられる⁽⁶⁸⁾。ただし $r \ll d$, $d \ll h$ とした。

遅延時間 t_d , 特性インピーダンス z_0 は

$$t_d = \sqrt{L_d \cdot C_d} \quad (3.13)$$

$$z_0 = \sqrt{L_d / C_d} \quad (3.14)$$

として近似的に得られる。

式(3.11)における μ は媒質の透磁率, μ_1 は導体の透磁率である。また式(3.12)における ϵ は媒質の誘電率である。

線路長 6.8 m の磁性線ケーブル線路についての実験から次の測定値が得られた。

$$L_d = 1.39 \times 10^{-6} \text{ H/m}$$

$$C_d = 4.62 \times 10^{-12} \text{ F/m}$$

$$Z_{01} = \sqrt{L_d / C_d} = 173 \Omega$$

$$t_{d1} = \sqrt{L_d \cdot C_d} = 8.01 \text{ ns/m}$$

$$Z_{02} = 180 \Omega$$

$$t_{d2} = 7.3 \text{ ns/m}$$

こゝで Z_{01} , t_{d1} は L_d , C_d の測定値から式(3.13)および式(3.14)によって計算した値であり, Z_{02} , t_{d2} は半値幅 50 ms の自乗正弦波パルスの反射波形から測定した値である。

測定の結果, 実験線路の s は $s = 0.55 \text{ mm}$ であった。また銅線と磁性線とのイタダクタンスの比較から磁性線の実効透磁率 μ_{eff} として 6.9 が得られた。また媒質の比誘電率として, ポリエステルとポリエチレンの比誘電率の算術平均を便宜的にとると, 表 3.3 から $\epsilon_{eff} \approx 2.8$ が得られる。これらの値を式(3.11)～式(3.14)に代入すると, 自由空間における $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ (H/m)}$, $\epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12} \text{ (F/m)}$ として

$$L_d = 1.37 \times 10^{-6} \text{ H/m}$$

$$C_d = 4.65 \times 10^{-12} \text{ F/m}$$

$$Z_0 = 172 \Omega$$

$$t_d = 7.98 \text{ ns/m}$$

となり、実験線路による測定値とほぼ一致する計算値が得られた。

また半値幅 50 ns の自乗正弦波パルスによる信号減衰率の測定値は -0.28 dB/m であった。

3.3.6 10万ビット記憶スタックの設計要項

以上の検討結果にもとづき、2048 語、語長 50 ビット (102,400 ビット) の記憶スタックを設計することとした。

記憶スタックの基本回路構成を図 3.49 に示す。それぞれ 1024 語、50 ビットからなる表、裏のサブスタックに分割し、この 2 個のサブスタックを背中あわせに配置して 128 語ごとに折畳む構造とした。桁線の接続はブリッジ方式⁽⁷⁰⁾とし、桁電流による書込み雑音を同相信号として差動読出し増幅回路で抑圧するとともに、桁線路実効長の短縮をはかった。

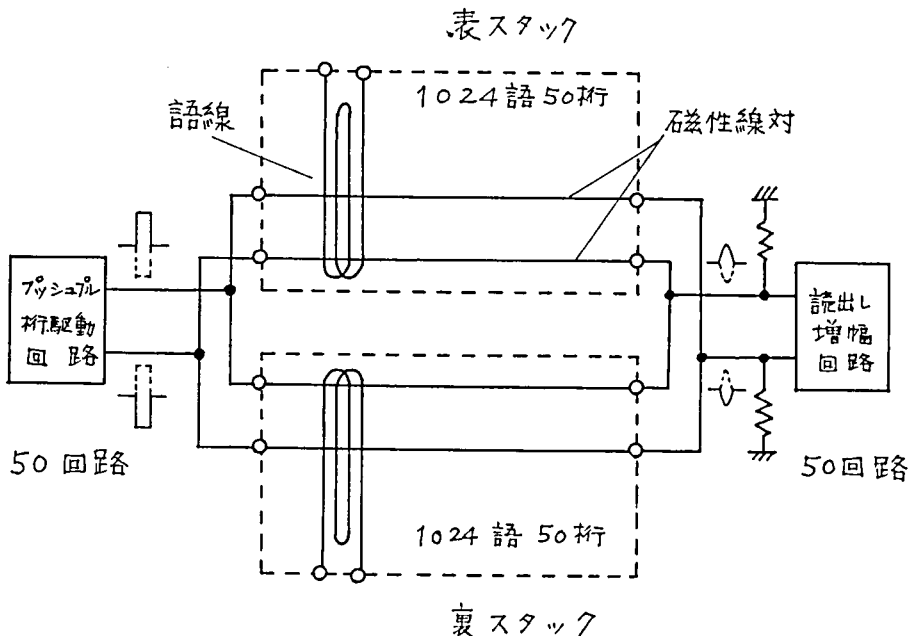


図 3.49 記憶スタックの基本回路構成

磁性線ケーブルは 50 リール分しか用意できなかったため、25 対単位のケーブルとし、これを 2 枚並列配置することとした。また語線ケーブルは 32 語分を単位とした。

記憶スタックの構造を図 3.50 に、設計要項を表 3.7 に示す。

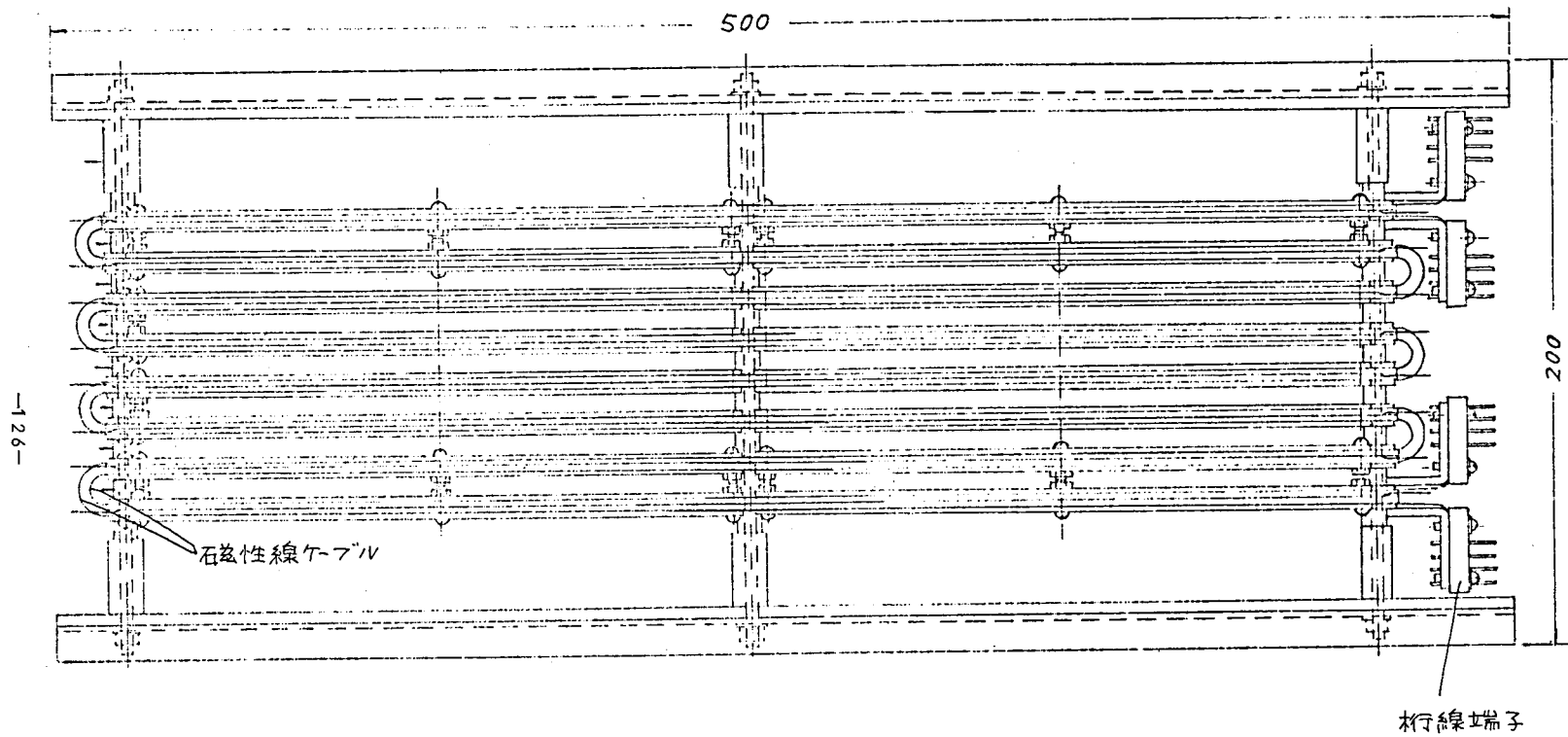


図 3.50(a) 2048語／50ビット記憶スタックの構造，正面図

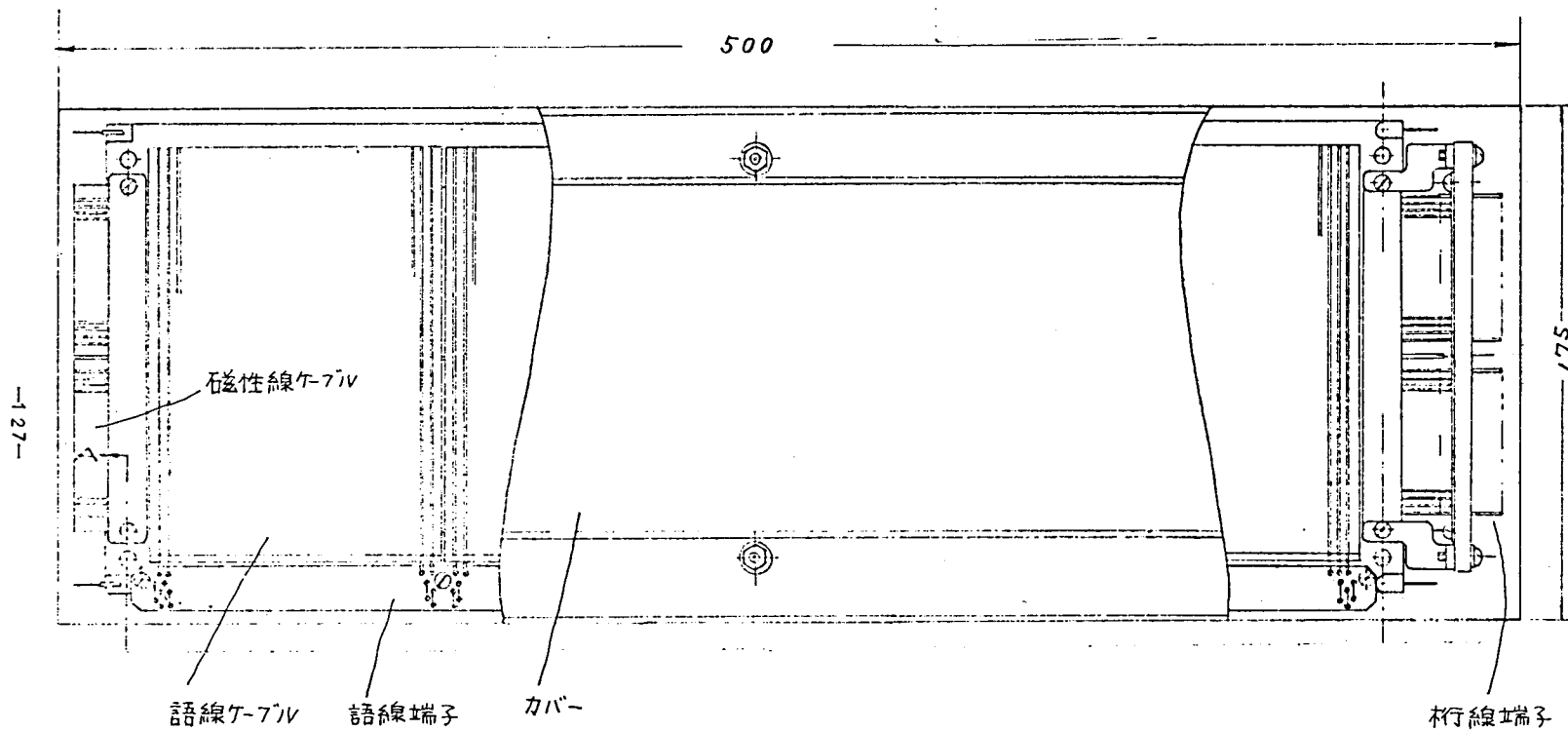


図 3.50(b) 2,048語／50ビット記憶スタックの構造，平面図

表 3.7 2,048語, 50ビット磁性線ケーブル記憶
スタックの設計要項

項	目	設 計 値
磁性線 ケーブル	対をなす磁性線の中心間距離	0.5 mm
	磁性線対の中心間距離	2.0 mm
	単位ケーブルの磁性線数	2.5 対 (テープ幅 5.8.5 mm)
	ケーブル厚み	0.27 mm (磁性線径 0.2 mm)
	ケーブル長	3,880 mm (1024語長, 端末部分を含む)
	テープ材料	ポリエステル・ポリエチレン
語線 ケーブル	対をなす導線の中心間距離	0.5 mm
	語線の中心間距離	3.0 mm
	導線径	0.1 mm ϕ
	単位ケーブルの語線数	32 対 (テープ幅 9.9.5 mm)
	ケーブル厚み	0.13 mm
	ケーブル長	320 mm (50ビット長, 端末部分を 含む)
	テープ材料	ポリエステル・ポリエチレン
ケーブル 接 着	接 着 剤	3M-6465両面接着テープ (厚み 50 μ)
基 板	印刷配線基板	2.0 mm厚ガラス・エポキシ樹脂積層板, 片面銅箔 35 μ 厚み
組 立	上, 下語線の位置ずれ	< 0.05 mm
	磁性線と語線の直交度	$90^{\circ} \pm 1^{\circ}$
	磁性線ケーブル折返し部の曲率半径	> 10 mm
	磁性線ケーブル折返しおよび端末部	ケーブル・クランプを設ける。クランプ端より少くとも3mm離れて語線を配置する。

表 3.7 つづき

項 目		設 計 値
電 気 的 性 能	語 電 流	600 mA \pm 10 % 立上り時間 50 ns
	桁 電 流	30 mA \pm 10 %
	読 出 し 電 圧	> 6 mV** (特性インピーダンス終端, 2 交点)
	桁線遅延時間	30 ns
	桁線特性インピーダンス	170 Ω
	桁線信号減衰率	< 1.1 dB
	語線インダクタンス	0.65 μ H
	語線逆起電圧	< 8 V

* 桁電流駆動回路の制限による。(3.5章)

** 読出し増幅回路系の許容最低入力レベル 3 mV の 2 倍とした。(3.5章)

3.3.7 本章の概要

電子交換機用を目的とする信頼性、経済性に重点をおいた記憶スタックの設計基本方針について述べ、記憶容量 10 万ビットをもつ記憶スタックの電氣的、機構的設計検討を行った。

語線については駆動用半導体素子の周波数・電力積に対する要求を緩和するため 2 ターン構成とし、配列寸法および許容偏差を実験的に検討して定めた。また逆起電圧を近似計算し、実験値と比較検討した。

桁線については、磁性線ケーブルの端末および折返し部分の特性劣化について検討し、機構設計上のデータを得た。磁性線ケーブルの伝送特性については、計算値と実測値が比較的良い一致を示すことを明らかにした。

以上の検討にもとづき、2,048 語 / 50 ビットの容量をもつ記憶スタックの設計要項をまとめ、表に示した。

3.4 磁性線ケーブル記憶スタックの特性

3.4.1 磁性線ケーブルの特性

設計要項(表3.7)の注に述べたように、試作スタックによる部分実装システムのために設計した桁電流駆動回路の最大電流が、一磁性線あたり約60mAであるため、テープ・ケーブルに封入する磁性線として低桁電流に動作点をもつものを選定した。その平均特性曲線を図3.51に示した。

ケーブル内における磁性線の配列寸法精度は、図3.52に示すように、各対の中心間距離については累積をふくめて±0.02mm以内にあり、また対をなす磁性線の中心間距離は全体的に0.07mm程度長めであった。ケーブル成形機の寸法出しロールの溝寸法補正により、配列寸法精度は3.2.3におけるよりも改善することができた。

3.4.2 記憶スタック

の伝送特性

試作した磁性線ケーブル記憶スタック(2048語/50ビット)の外観を図3.53に示した。

図3.54は語線端子に対する番地わりつけを示したものである。

磁性線ケーブルの任意に選んだ5対について、1MHz

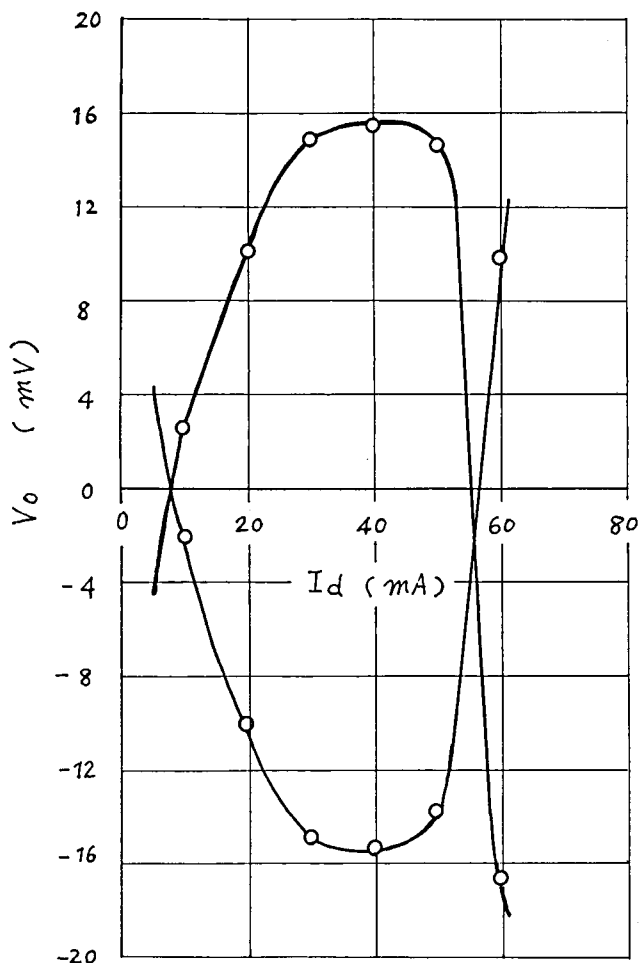


図3.51 磁性線#22の I_d-V_o 曲線

(測定パルス系列: 図3.40, $I_c=200\text{mA}$,
 $I_w=700\text{mA}$, $t_r(I_w)=50\text{ns}$)

インピーダンス・ブリッジによる測定値の平均は次の通りであった。

直流抵抗 31.3 Ω

(2 磁性線分)

インダクタンス $L_d =$

5.18 μH

静電容量 $C_d = 181$ pF

これらから式 (3.13) および (3.14) によって

$$Z_0 = 169 \Omega$$

$$t_d = 30.5 \text{ ns}$$

が得られた。

また磁性線対の近端から振幅 10 mV, 半値幅 50 ns の自乗正弦波パルスを送り, 終端短絡による反射波の遅延時間 $2 t_d$ と減衰率 $2 \alpha_d$ は

$$2 t_d = 57.4 \text{ ns}$$

$$2 \alpha_d = -2.19 \text{ dB}$$

であり, 反射係数を零にする終端抵抗値 Z_0 は

$$Z_0 \simeq 180 \Omega$$

であった。磁性線ケーブルの全長は約 3.88 m であり, 以上の測定値は 3.3.5 における検討結果と良い一致を示した。

語線のインダクタンス測定値は, $2 \text{ A} / \mu\text{s}$ で直線的に立上る大電流パルスを通したときの逆起電圧から逆算して

$$L_w = 0.59 \mu\text{H}$$

が平均値として得られた。語線の一端から他端までの遅延時間は約 4 ns であり, 語電流の立上り時間に比べて無視しうる程度であった。また直流抵抗の平均値は 1.49 Ω であった。

図 3.55 に, 語電流振幅をパラメータとする語線の逆起電圧測定値をプロットして示した。

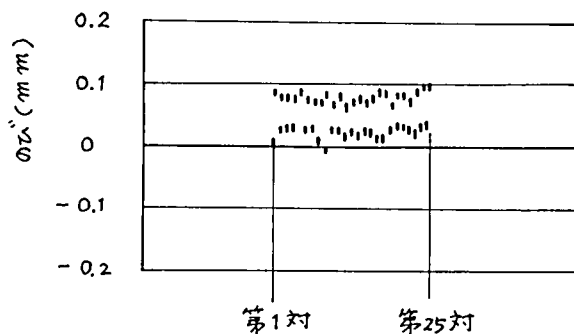
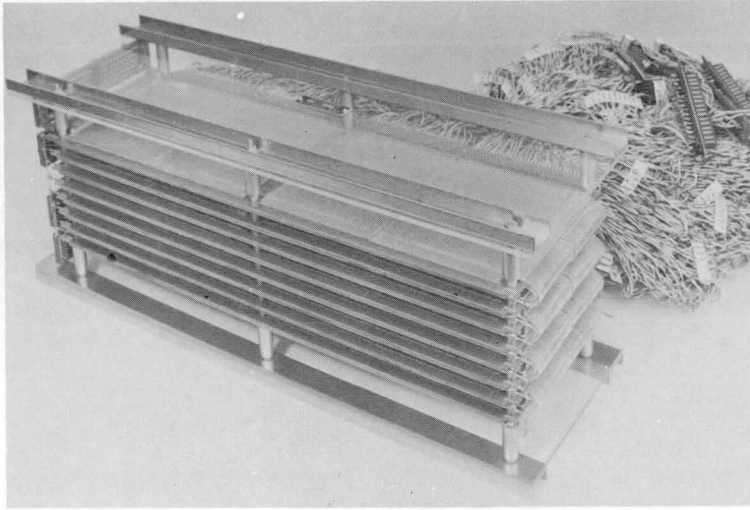
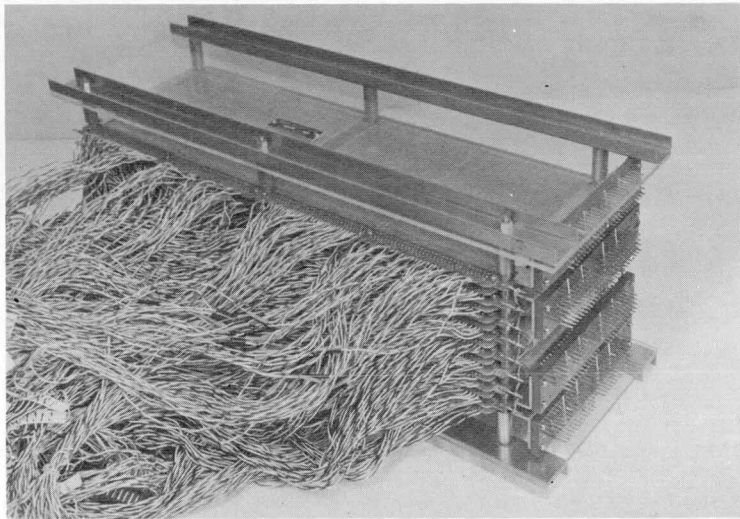


図 3.52 25 対磁性線ケーブルの磁性線

配列寸法精度



(a)



(b)

図 3.5.3 磁性線ケーブル記憶スタックの外観

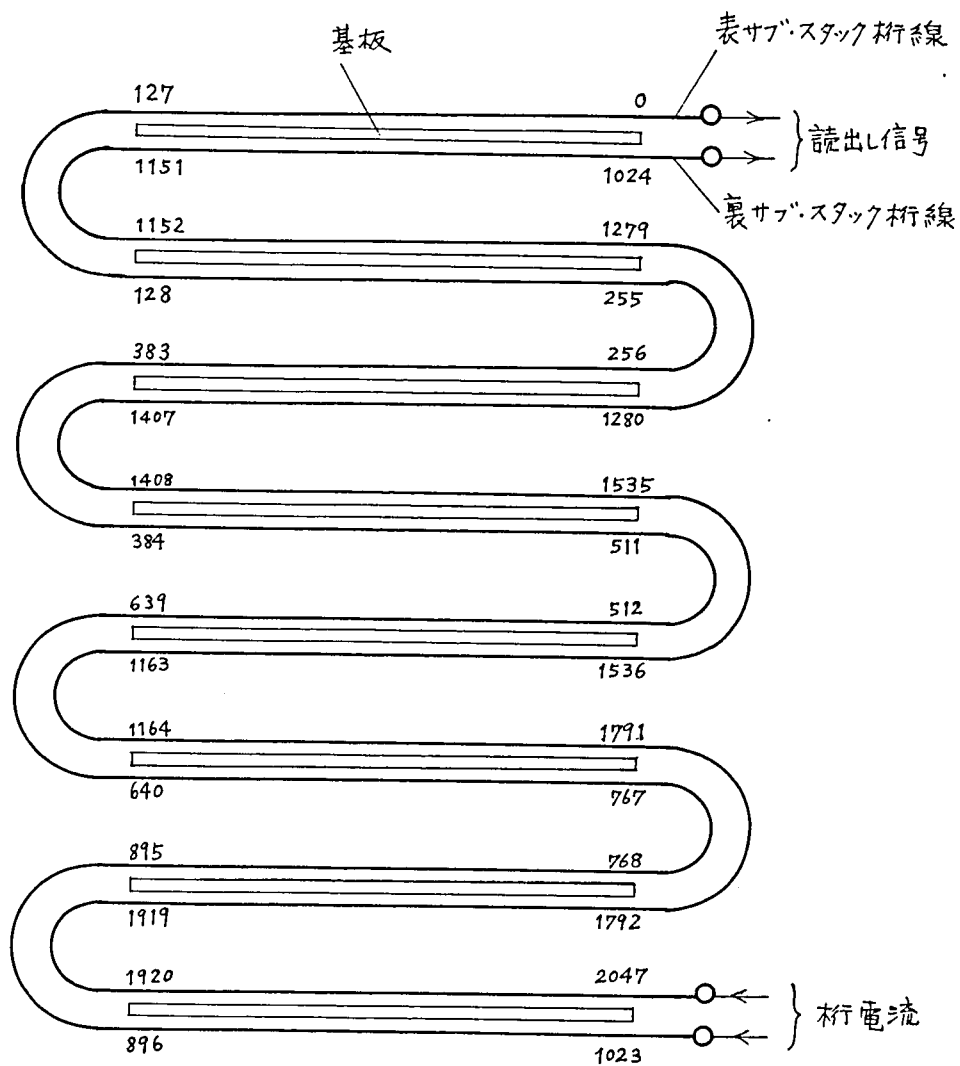


図 3.5 4 記憶スタックの番地わりつけ

3. 4. 3 回路構成

記憶スタックの記憶動作特性を測定するための回路構成を図 3. 5 6 に示す。

語電流 I_w は共通モード・チョーク (Common mode choke) OMC を経由して不平衡-平衡変換されたのち、リード・リレーによる走査スイッチによって番地選択された特定の語線に流れる。平衡電流によって、語線と桁線間の結合静電容量を介して桁線にあらわれる誘起電圧は往路によるものと復路によるものとが打消しあい、信号対雑音比が改善される。

桁電流 I_d は同じく共通モード・チョーク OMC によって不平衡-平衡変換され、桁線対に極性を異にする等振幅電流が流れる。

共通モード・チョークは H_{5A} 材 D 8 磁心にベア線を 50 回巻いたものである。

桁線と読出し電圧増幅用の差動増幅器との結合回路は、1) インピーダンス不整合がないこと、2) 差動増幅器入力への信号減衰が少ないこと、3) 他方のサブ・スタックへの信号まわりこみが少なく、有害な多重往復反射がおさえられること、などの条件を満足することが必要である。

図 3. 5 7 の抵抗結合回路において

$$Z_0 = Z_1 + \frac{Z_2(Z_1 + Z_0)}{(Z_1 + Z_0) + Z_2} \quad (3.15)$$

なる整合条件を満足する Z_2 は

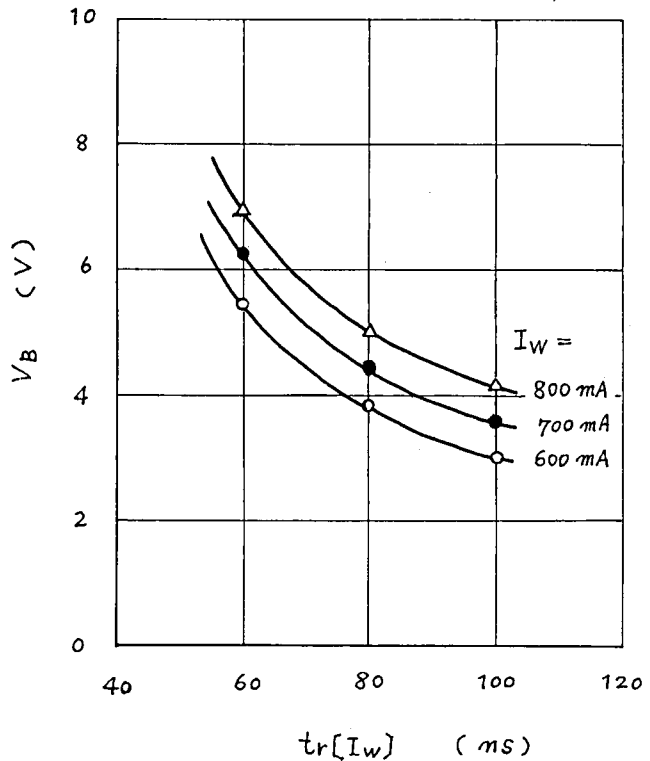


図 3. 5 5 語線の逆起電圧

図 3.5 6 動作特性測定のための回路構成

$$Z_2 = \frac{Z_0^2 - Z_1^2}{2Z_1} \quad (3.16)$$

である。このとき、端子 1, 2 を入力として、端子 5, 6 における信号減衰率 α_1 は

$$\alpha_1 = 20 \log_{10} \frac{Z_0 - Z_1}{Z_0}, \quad (\text{dB}) \quad (3.17)$$

また端子 3, 4 における信号減衰率 α_2 は

$$\alpha_2 = 20 \log_{10} \frac{Z_0 - Z_1}{Z_1 + Z_0}, \quad (\text{dB}) \quad (3.18)$$

となる。ただし読出し増幅器の入力インピーダンスは Z_0 に比べて充分大きいとした。

$Z_0 = 170 \Omega$ における Z_2, α_1, α_2 の計算値を表 3.8 に示した。

表 3.8 桁線結合回路の損失計算値
($Z_0 = 170 \Omega$)

$Z_1/2$ (Ω)	Z_2 (Ω)	α_1 (dB)	α_2 (dB)
1.0	71.3	-1.62	-2.08
1.5	46.7	-1.65	-3.10
2.0	34.2	-2.34	-4.20
3.0	21.1	-3.80	-6.40
5.0	9.45	-7.72	-11.7
7.0	3.32	-15.1	-20.3

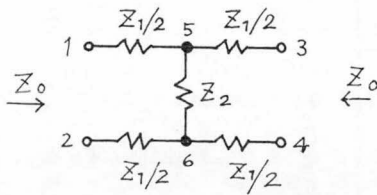


図 3.57 桁線結合回路

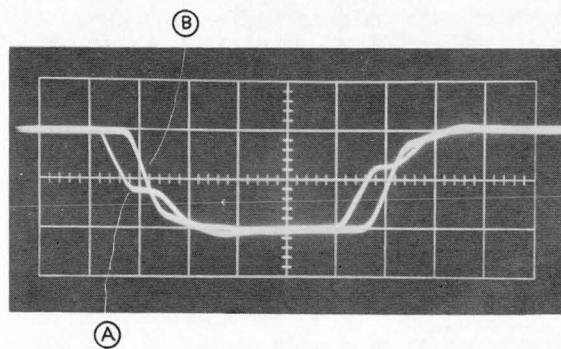


図 3.58 立上り時間、立下り時間約 30 ns の
桁電流入力パルスによる図 3.56 の点
①, ②における波形
($50 \text{ ns}/\text{HORIZ. DIV.}$)

この結果から $Z_1/2 = 20 \Omega$, $Z_2 = 340 \Omega$ を選ぶことにした。このとき差動増幅器入力への結合損失は -23.4 dB , まわり込み信号の減衰は -42.0 dB である。

桁線線路の遅延時間 t_d は片道約 30 ns あるので, 図 3.56 の点 A と点 B とにおける桁電流波形は, 早い立上り時間をもつとき図 3.58 に示すようになる。図 3.59 は $t_d = 30 \text{ ns}$ として, 立上り, 立下り時間ともに $t_r = t_f = 20 \text{ ns}$, および 60 ns 入力パルスに対する点 A と点 B における桁電流波形を伝送損失がないものとして図式的に示したものである。 $t_r = t_f = 2 t_d$ であれば桁電流波形の段は解消する。

したがって以下の測定では, 振幅の $10\% - 90\%$ で定義した t_r, t_f を 100 ns として行なった。

桁駆動回路と桁線の間には, 図 3.56 に示すように, 互いに逆方向に並列接続したダイオードを接続し, 小振幅読出し電圧に対する桁電流駆動回路の負荷効果を遮断した。

語電流の立上り時間は, 引出し線を 50 cm 程度に長くしたため, 60 ns 以下に早くすることはできなかった。

3.4.4 記憶スタックの動作特性

測定パルス波形を図 3.60 に示す。時間関係はいずれも語線および桁線の入力端において規定する。波形写真を図 3.61 に示した。

書き込み語電流 I_{ww} に対する読出し電圧曲線から, I_{ww} の振幅をきめるために, 図 3.62 (a) に示すパルス系列において, 読出し語電流 $I_{wR} = 700 \text{ mA}$ 一定とし, 書き込み桁電流 I_{dw} をパラメータとする曲線として図 3.63 を得た。

また読出し語電流については, 図 3.62 (b) のパルス系列によって図 3.64 の曲線を得た。

これらの特性から, 電流値の設定を $I_w = 700 \text{ mA}$, $I_d = 30 \text{ mA}$ とすることにした。 $\pm 10\%$ の振幅変動を考慮すると, 最悪値において $I_{ww} = I_{wR} = 630 \text{ mA}$, $I_{dw} = 27 \text{ mA}$ 妨害語電流 I_{wd} および妨害桁電流 I_{dd} はそれぞれ 770 mA および 33 mA となる。

隣接ビット妨害を含む, 電源変動 $\pm 10\%$ を考慮した最悪パルス系列として, 図 3.65 を設定した。

いま番地走査スイッチによって N 番地が選択されたとすると, 1×10^3 回の強い補数書き込みが行なわれたのち, 真数情報の弱い 1 回書き込みが行なわれる。その次には $N + 1$ 番地が選択されるので, 片側隣接ビットから 1×10^3 回の強い補数書き込み妨害を受ける。番地選択が一巡して $N - 1$ 番地が選択されると, また他方の片側隣接ビットから 1×10^3

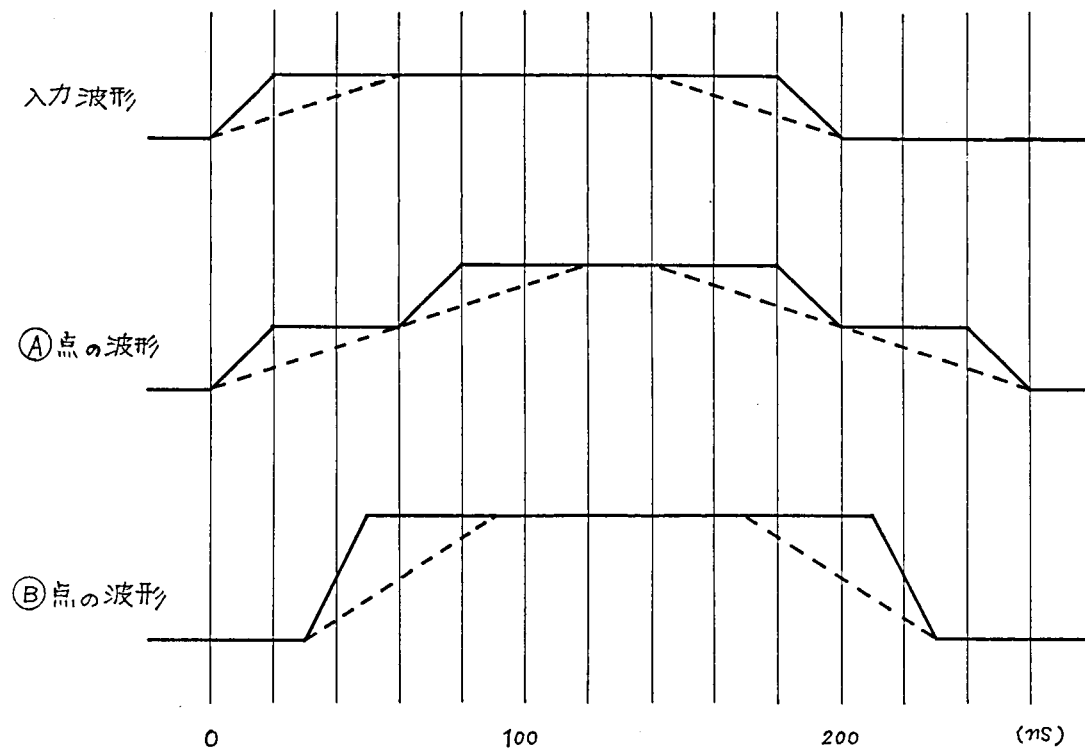


図 3.5 9 $t_d = 30 \text{ ns}$ のときの桁電流パルス波形

(実線 ; $t_r = t_f = 10 \text{ ns}$
 点線 ; $t_r = t_f = 30 \text{ ns}$

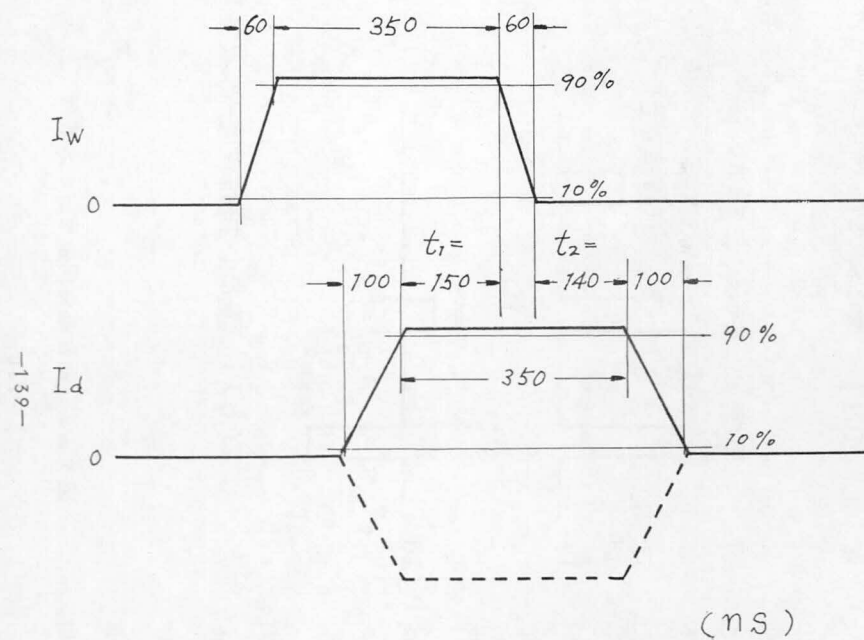


図 3.60 測定パルス波形

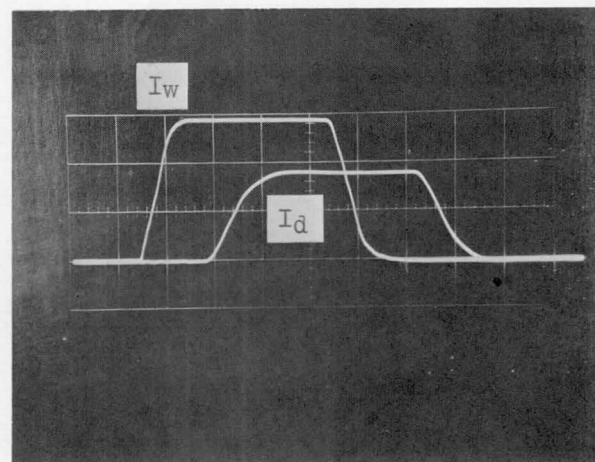


図 3.61 入力端における測定電流波形
(100 ns/HORIZ. DIV.)

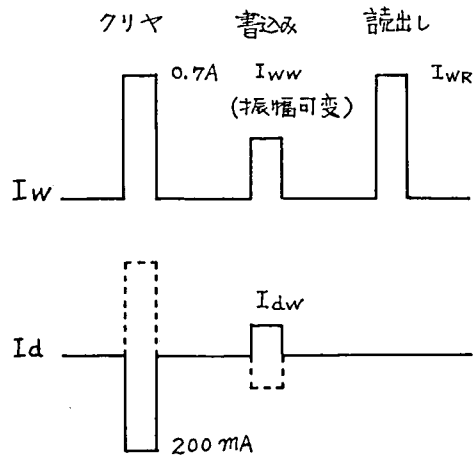
回の強い補数書込み妨害を受け、つぎいてN番地からさきに書込んだ真数情報が弱く読み出される。このようにして、次々と妨害読み出し電圧が得られる。

妨害回数は、100回以下で充分に妨害読み出し電圧が一定値に飽和することが確認された。

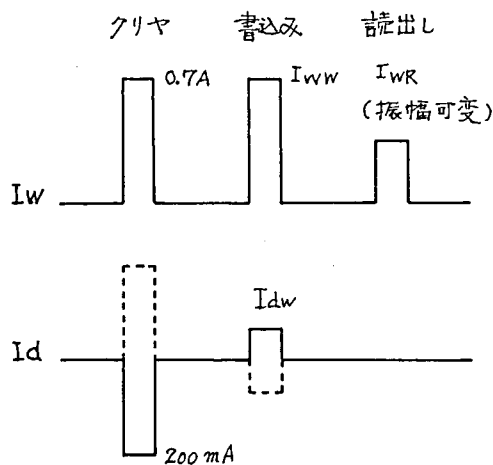
動作点を変えたときの読み出し電圧の最小値および最大値のプロットの一例を、図3.66および図3.67に示した。

最悪パルス系列において、桁線結合回路の損失を含んだまゝでも、設計要項で定めた最低レベルを充分満足しうることが明らかとなった。

タイミング設定に対する余裕度を調べるために、図3.60における語電流と桁電流の重なり時間 t_1 、および桁



(a) 書込み特性測定パルス系列



(b) 読み出し特性測定パルス系列

図3.62 動作条件測定用パルス系列

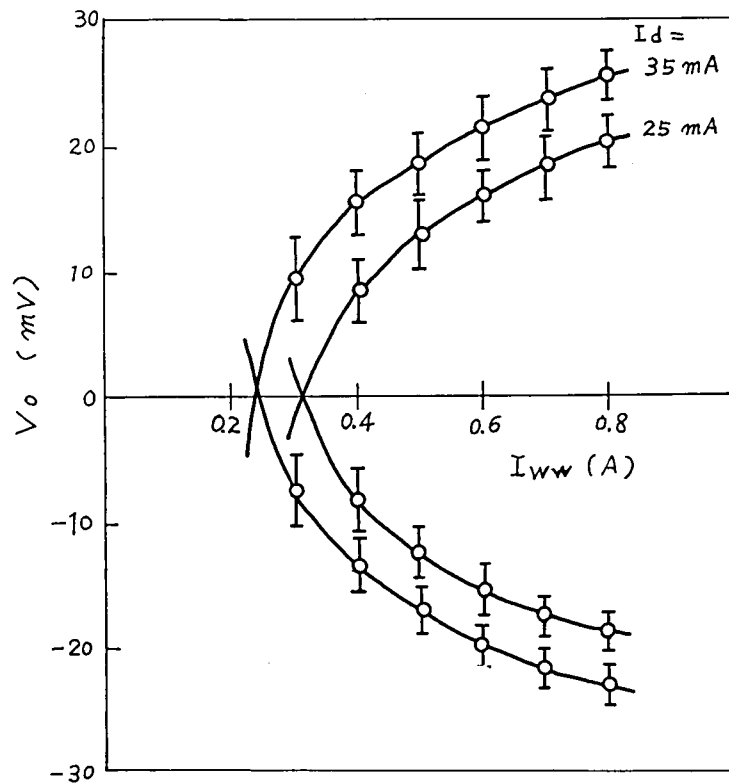


図 3.63 $I_{WR} = 700$ mA 一定としたときの書込み語電流特性,
磁性線井 22 (0 ~ 31 番地, 13 桁)。
最大値, 最小値, 平均値を示した。

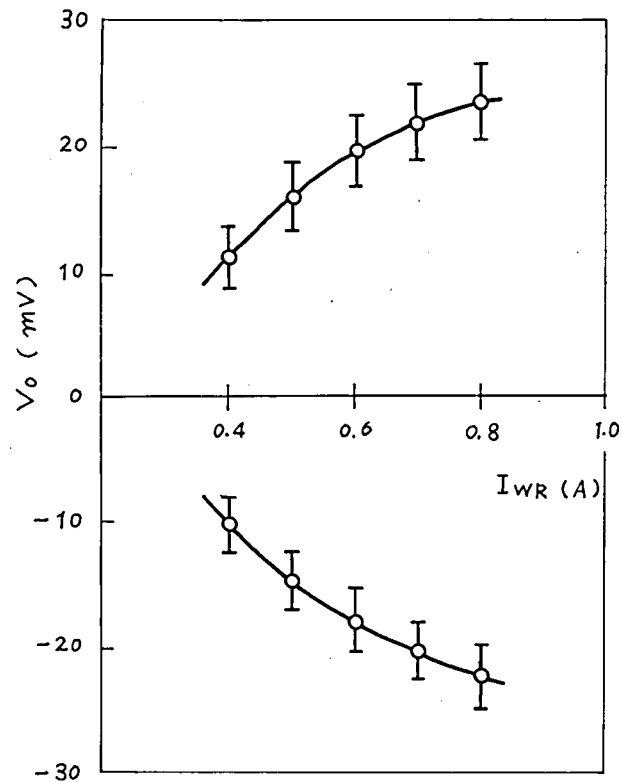


図 3.64 $I_{ww} = 700$ mA, $I_{dw} = 30$ mA 一定としたときの読出し
語電流特性, 磁性線井 22 (0 ~ 31 番地, 13 桁)。

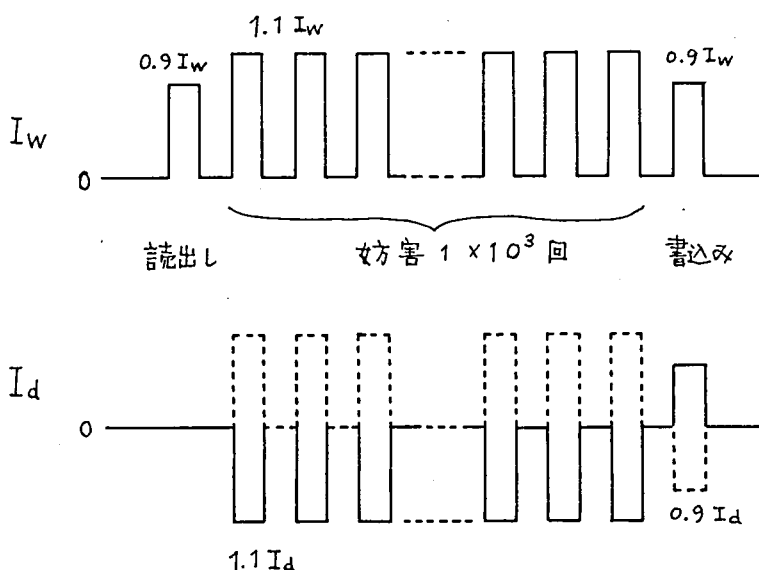


図 3.65 $I_w \pm 10\%$, $I_d \pm 10\%$ における

最悪試験パルス系列

電流後続時間 t_2 を可変して飽和レベルで規準化した平均読出し電圧をプロットして図 3.68 に示した。図 3.59 から明らかなように、読出し増幅器からみて遠端にあるビットがきびしい条件にあるので、測定番地は 992～1023 番地とした。

図から明らかなように、語電流の立下り時間のあいだ、桁電流が平坦部を保持していれば充分である。

3.4.5 記憶スタックの温度特性

図 3.60 および図 3.65 に示した測定パルス波形および測定パルス系列によって、記憶スタックからの読出し電圧の温度特性を測定した。

記憶スタックの全体を恒温槽内に入れ、槽内温度が規定値に達してから少なくとも 15 分おいて測定を開始するようにした。温度は 0°C から 20°C おきに 60°C までとした。

測定ビットは 0～7 番地および 504～511 番地の計 16 ビットとした。

桁電流は 50 Ω 同軸ケーブルで、また語電流および読出し電圧は特性インピーダンス約 130 Ω の対撚り線でそれぞれ引出したが、線長が約 2 m におよぶため、読出し電圧レベ

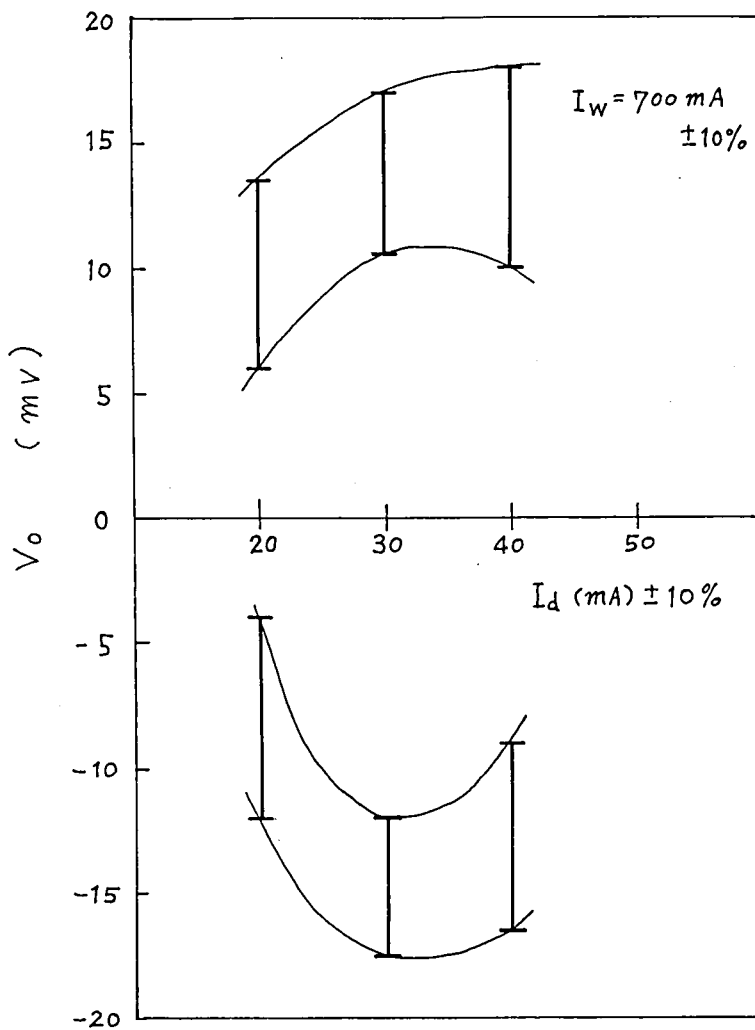


図 3.6.6 最悪パルス系列における $I_d - V_o$ 特性。

(0 ~ 31 番地, 992 ~ 1023 番地, 13 桁。)

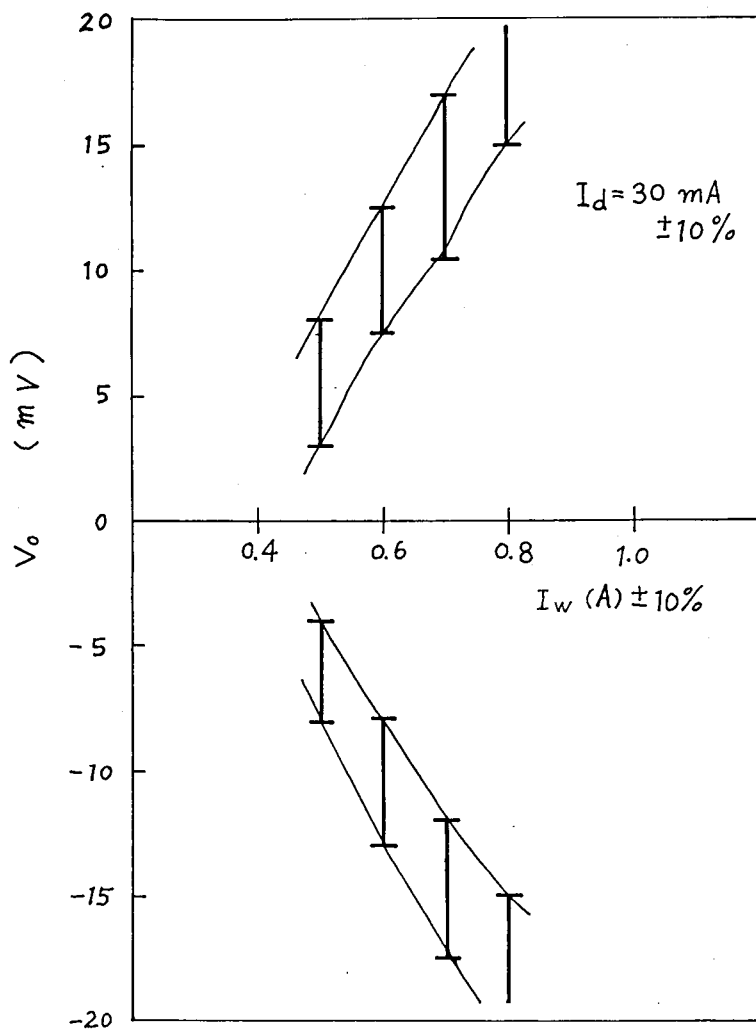


図 3.67 最悪パルス系列における $I_w - V_o$ 特性

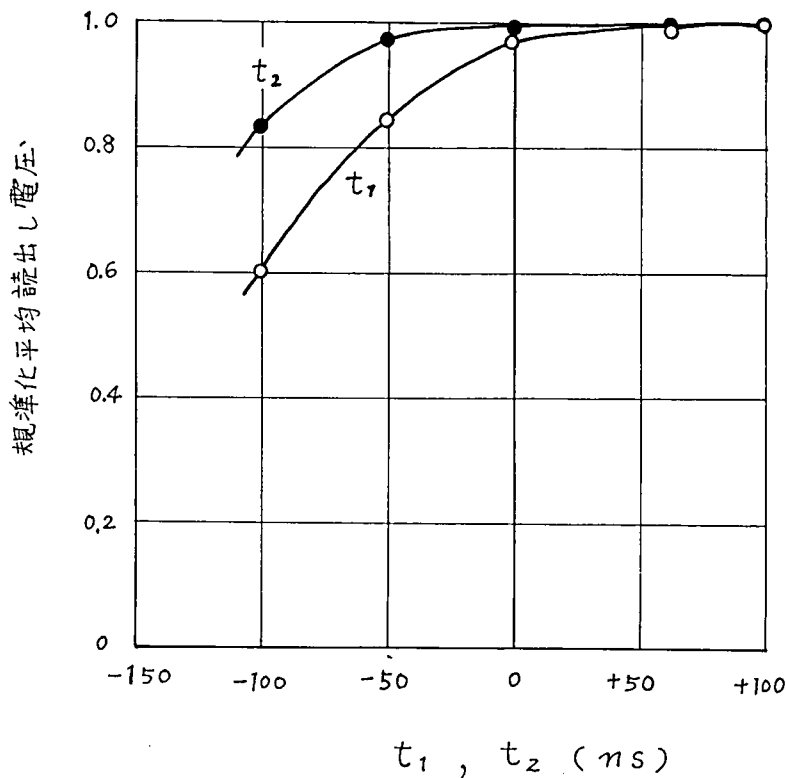


図 3.6.8 語電流と桁電流のタイミング余裕度
(992~1023番地, 13桁。)

ルは若干の減衰をうけている。

測定結果を図 3.6.9 に示す。20℃における温度係数は約0.22%/℃で、3.2.6におけるほぼ同じ値が得られた。

3.4.6 本章の概要

部分実装システム用に設計した桁電流駆動回路の最大電流値による制限から、桁電流約30mAで動作する磁性線を選定し、25対テープ・ケーブルを2048語50ビットの記憶スタック用として試作した。ケーブル内の磁性線配列寸法精度は、ケーブル成形機の寸法出しロールの溝補正により、3.2の第一次試作時よりも改善することができた。

この磁性線ケーブルを用いた記憶スタックの伝送特性について測定し、設計要項を満足する性能が実現されていることを確認した。つぎに記憶スタックの動作特性、温度特性を測定し、測定したビットの範囲では、設計要項を満足する性能が実現されていることを確

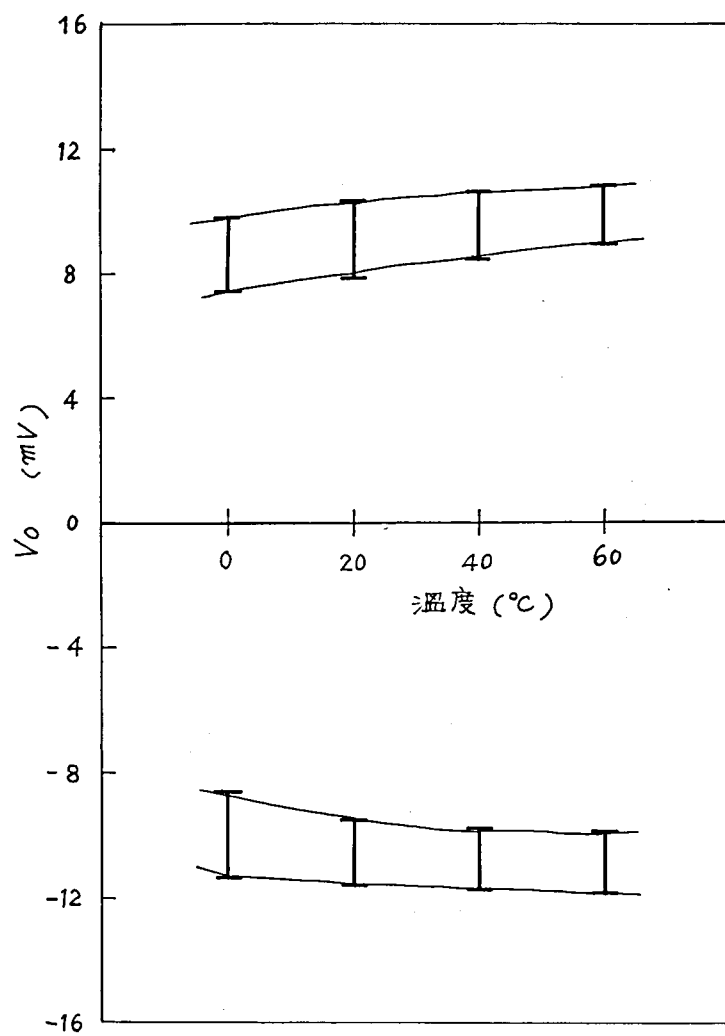


図 3.6 9 (a) 読出し電圧の温度特性, 0 ~ 7 番地, 1 3 桁。

($I_w = 700 \text{ mA} \pm 10\%$, $I_d = 30 \text{ mA} \pm 10\%$)

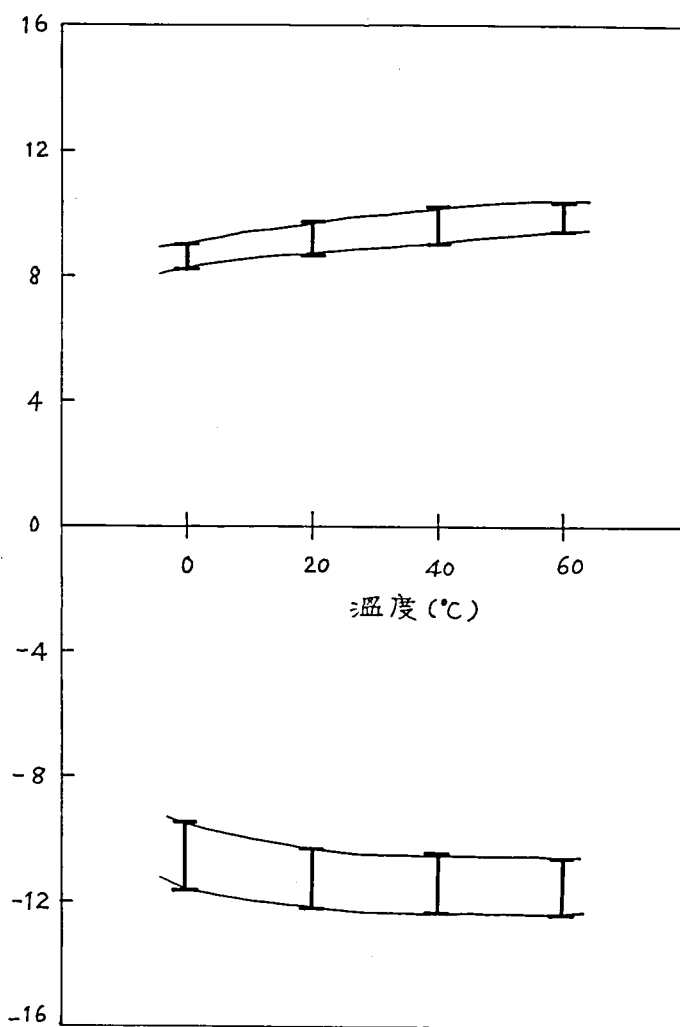


図3.69(b) 読出し電圧の温度特性, 504~511番地,

13桁。

($I_w = 700\text{mA} \pm 10\%$, $I_d = 30\text{mA} \pm 10\%$)

認した。

3.5 部分実装装置による磁性線ケーブル記憶スタック動作速度の検討

3.5.1 装置構成の概要

記憶スタックの動作速度について評価検討を行なうことを目的として、16語3ビット分の部分実装記憶装置を試作した。装置構成のブロック図を図3.70に示す。

CTC社のシステム・エクササイザSSE-1100から、書込み(WRITE)命令、読出し-再書込み(READ-REGENERATE)命令およびタイミング・パルス、アドレス・データ、入力データを周辺回路に送り、読み出されてきた出力データをチェックして入力データと一致しないときはエラー表示をして動作を停止する。実験装置の外観を図3.71に示した。

図3.72は記憶装置部分のブロック図である。

デコードされたアドレス・データはXドライブおよびYドライブに送られ、4×4のダイオード・マトリクスによって1個の番地が選択され、語線にパルス電流が流れる。

読み出された信号電圧は増幅された後ストロブ回路に入り、信号電圧だけが時間選択される。弁別回路で1, 0の判定を受けたのち、バッファを経由してデータ出力として外部に送られるとともに、再書込みのために桁ドライブのパルス電流極性を制御する。

表側サブ・スタックと裏側サブ・スタックとでは、回路構成上、情報の1, 0に対して読出し電圧の極性が反転しているのので、アドレス・デコーダからの出力によって、サブ・スタック切換回路が読出し情報の極性をスイッチする。

新しく情報を書き込むときは、データ入力がWRITE命令パルスによってゲートされて桁ドライブの極性を制御する。

装置を構成する主要回路の回路図を図3.73, 3.74, 3.75に示した。

図3.76は記憶スタック周辺の回路構成である。図3.75に示すように読出し増幅回路の入力端は、互いに逆方向に並列接続した2個のダイオードが接続されているので、大信号である桁電流パルスに対しては短絡される。したがって図3.76において、表側、裏側サブ・スタックの桁線線路は桁電流に対してそれぞれ特性インピーダンスZ₀で終端されるので、波形整形上の問題なしに高速パルスを流すことができ、3.4.3で述べたような間

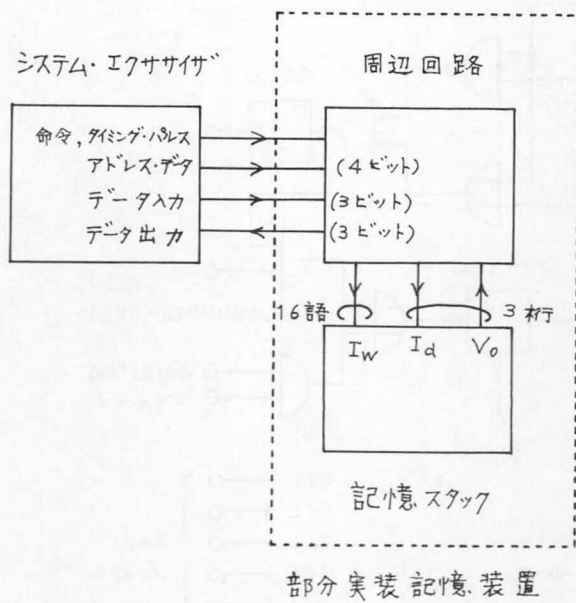


図 3.70 部分実装装置のブロック図

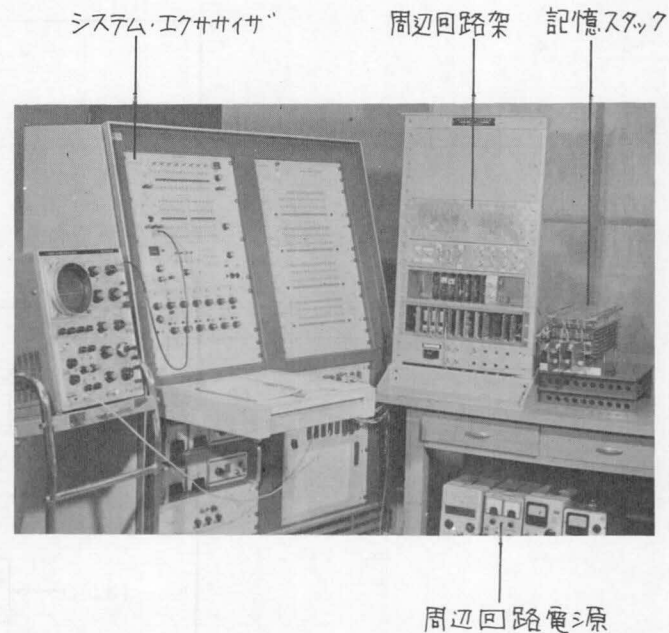


図 3.71 実験装置の外観

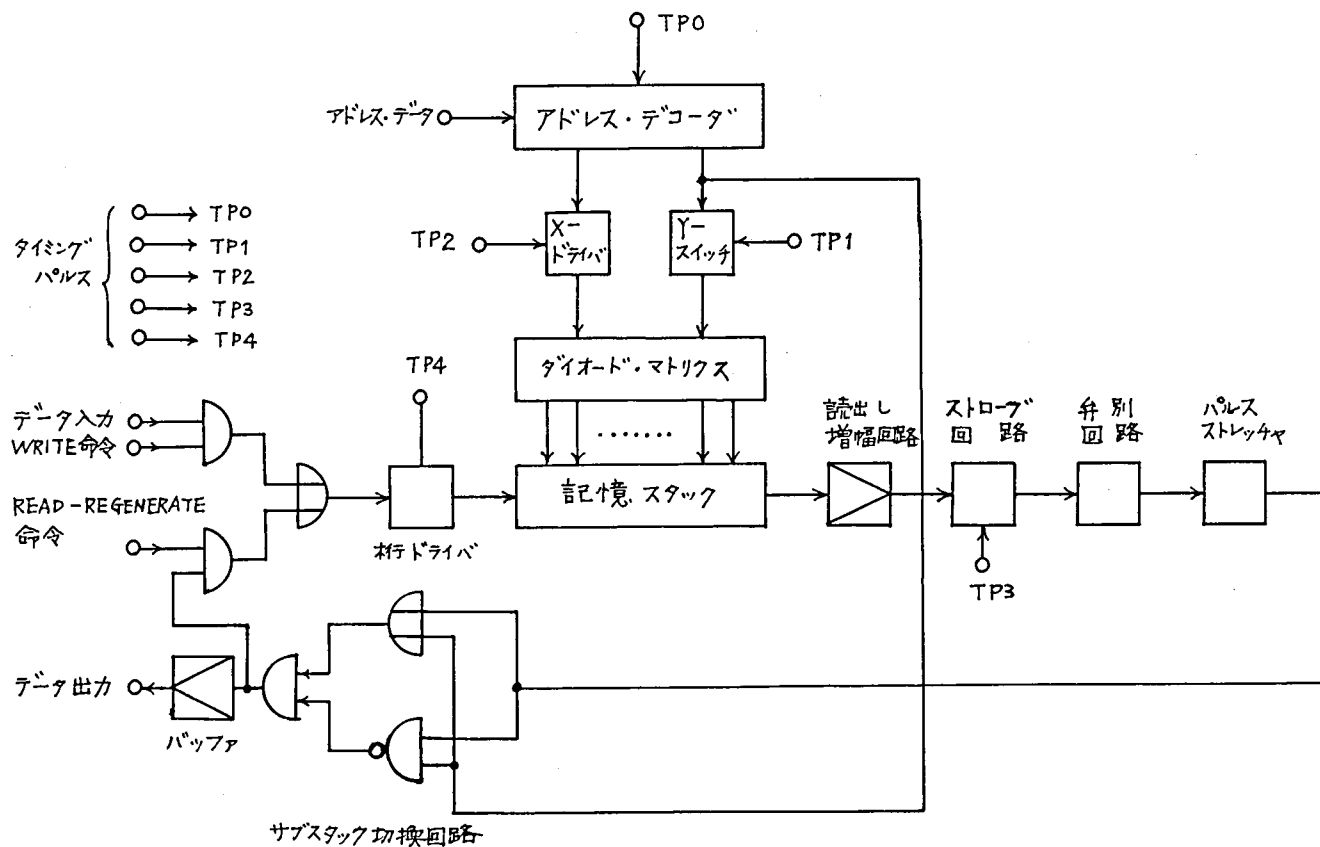


図 3. 7 2 記憶装置のブロック図

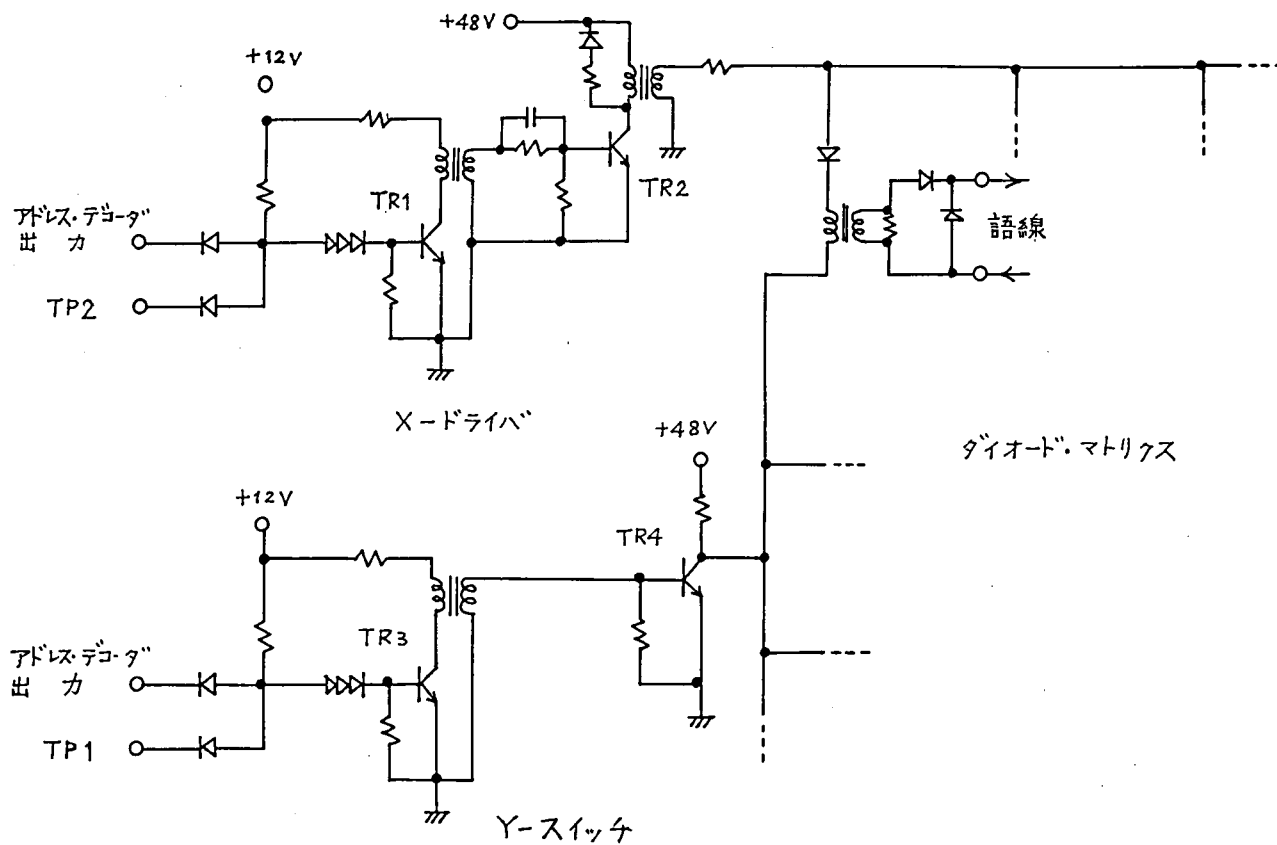


図 3.7.3 番地選択回路

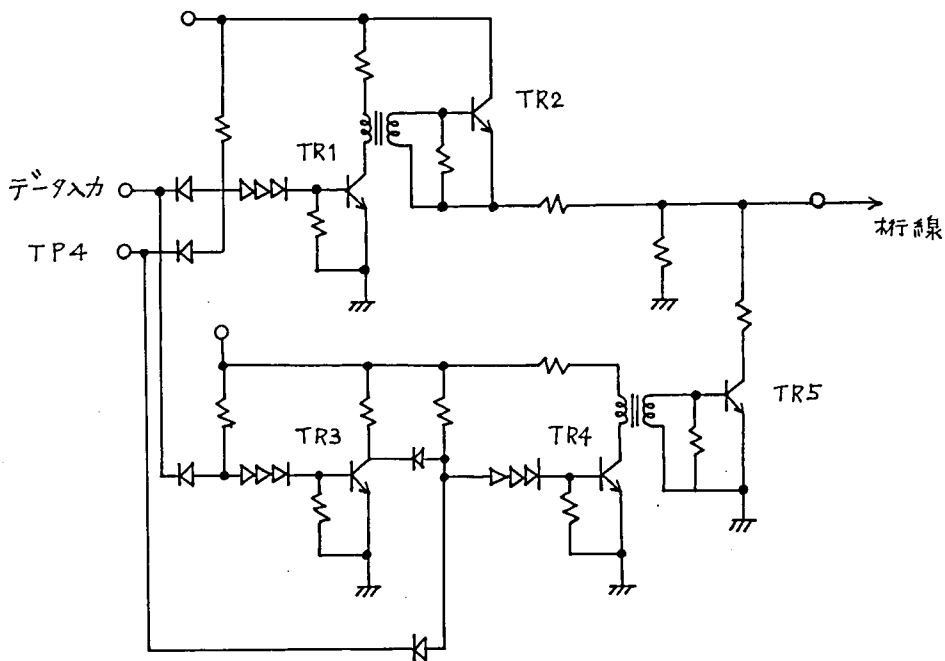


図 3.7.4 桁-ドライバ回路

題は解消する。

ダイオード対は桁電流による書き込み雑音を読出し増幅回路入力端で短絡してしまうので、過大入力による増幅回路の飽和をさける点からも有利である。これに加えて、図 3.7.5 に示したように、増幅回路は非線形インピーダンスを呈するダイオードを介して帰還がかけていて、過大入力に対しては効果的に利得が低下する。

ダイオード対は読出し信号のような小信号に対しては開放状態になるので、負荷効果はない。増幅回路の入力インピーダンス Z_i は、 $Z_i \gg Z_o$ であるから、読出し電圧 V_o は

$$(2Z_o / 3Z_o) \cdot V_o = (2/3) \cdot V_o$$

に減衰して増幅回路の入力に到達する。しかし一方、増幅回路入力端においてはインピーダンス整合されないで、反射係数を ρ として

$$(1 + \rho) \cdot V_o = (1 + \frac{3Z_o - Z_o}{Z_o + 3Z_o}) \cdot V_o = (3/2) \cdot V_o$$

だけ読出し電圧の振幅が増加する。

したがって結局、読出し電圧 V_o はそのまゝのレベルで増幅回路入力となり、損失はない。

図 3.75 センズ回路

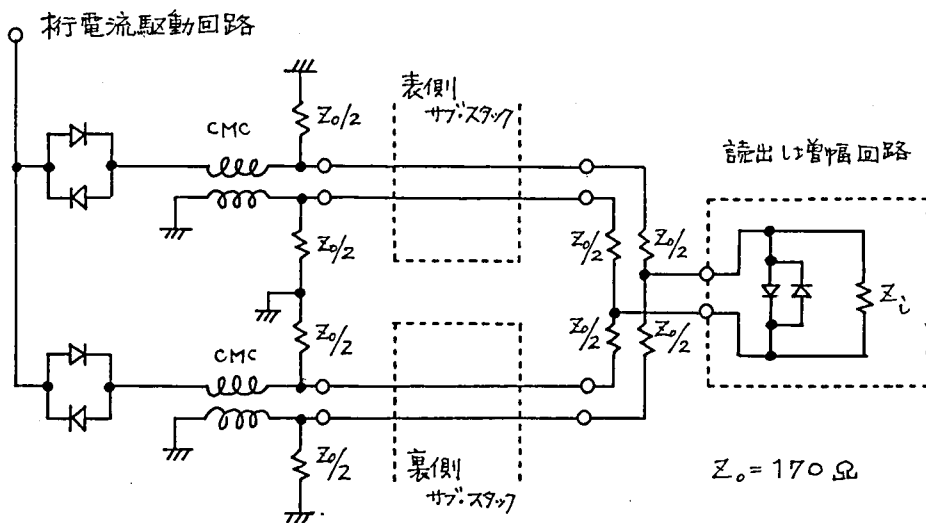


図 3.7.6 記憶スタック周辺の回路構成

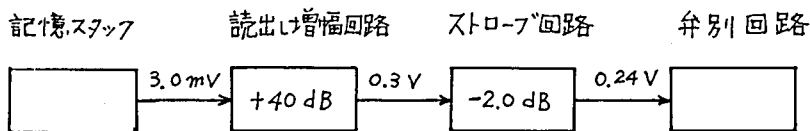


図 3.7.7 センス回路のレベル・ダイアグラム

桁線の桁駆動回路側はいずれも特性インピーダンスで終端されているので、読出し信号が記憶スタック内を多重往復反射する恐れはない。

図 3.7.5 に示したセンス回路系のレベル・ダイアグラムを図 3.7.7 に示した。弁別回路の情報 1, 0 弁別しきい値は 0.24 V であり、これは記憶スタック出力端に換算して 3.0 mV となる。このレベルは、試作記憶スタックの最悪読出し電圧レベルに比較して充分余裕がある値である。

部分実装の 16 語分は、表 3.9 に示すように、センス回路近端、遠端、および表側、裏側サブ・スタックに分配して語線と接続した。また桁側の 3 回路は、1.3, 1.4, 3.9 の各桁とした。相隣接する 1.3 桁, 1.4 桁間の漏話の影響はほとんど認められなかった。

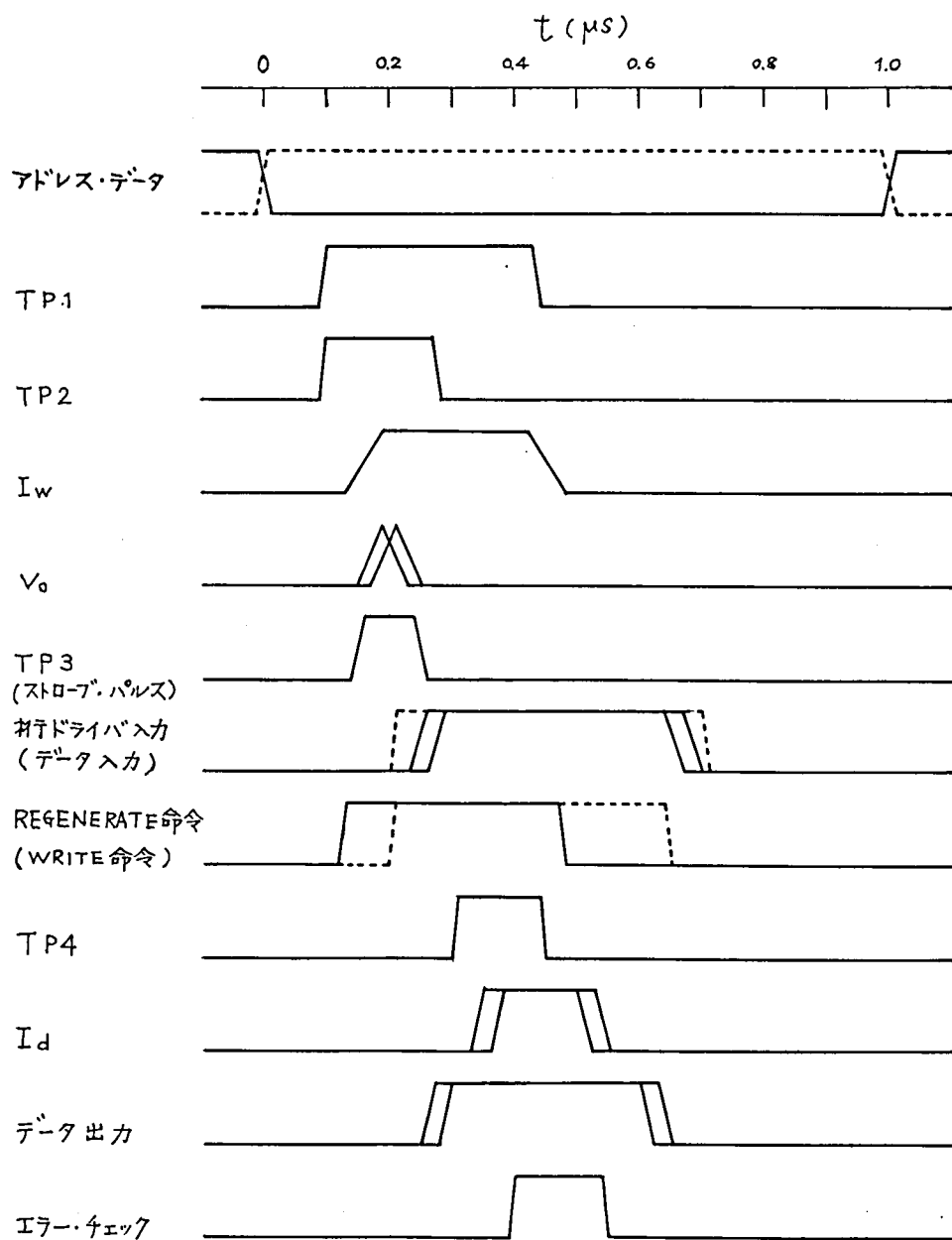


図 3.78 タイミング・チャート (サイクル時間 $1 \mu s$)

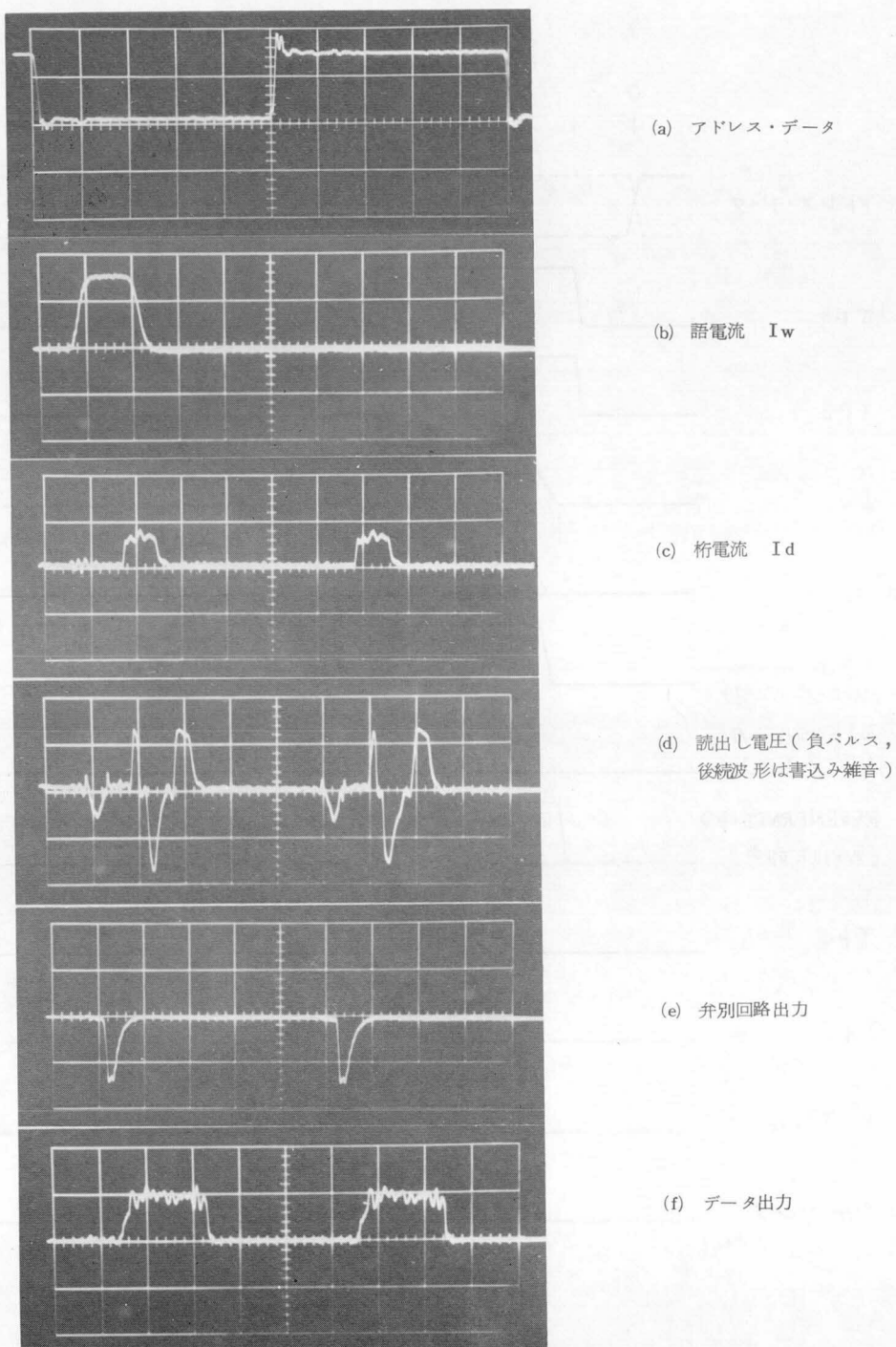


図 3.79 サイクル時間 $1 \mu\text{S}$ における動作波形
($0.2 \mu\text{S}/\text{HORIZ. DIV.}$)

3.5.2 動作速度の検討

3.3.6の設計要項において目標としたサイクル時間 $1\mu\text{S}$ におけるタイミング・チャートを図3.78に、また動作波形を図3.79に示す。写真から明らかなように、充分な余裕時間をもってサイクル時間 $1\mu\text{S}$ が実現できた。アクセス時間は 300ns であった。

ストローブ・パルスは、図3.80に示すように、近端出力と遠端出力の双方と重畳するように定めた。

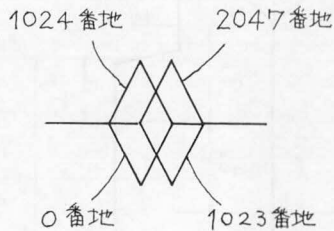
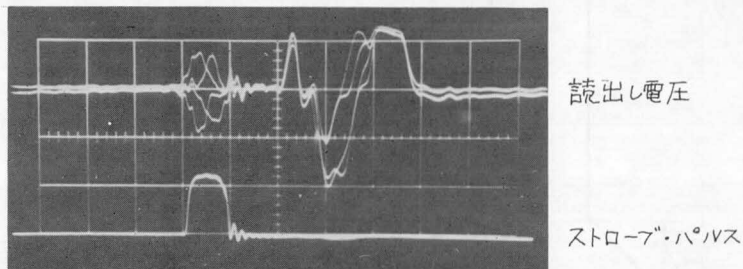


図3.80 読出し電圧とストローブ・パルスのタイミング

($100\text{ns}/\text{HORIZ. DIV}$)

サイクル時間 T_c およびアクセス時間 T_A を決定する時間要因を図3.81に示した。

すなわち

t_a = 起動入力を与えられてから語電流が流れ出すまでの時間。アドレス・データのデコード所要時間、駆動回路および選択マトリクスの応答時間など。

t_p = 読出し電圧のピーキング時間。語電流の立上り時間 t_{rw} にほぼ等しい。

t_d = 桁線の信号伝播時間。

t_i = センス回路の信号弁別までの所要時間。サブ・スタック切替時間を含む。

t_j = バッファ増幅回路などを介してデータ出力を得るまでの時間。

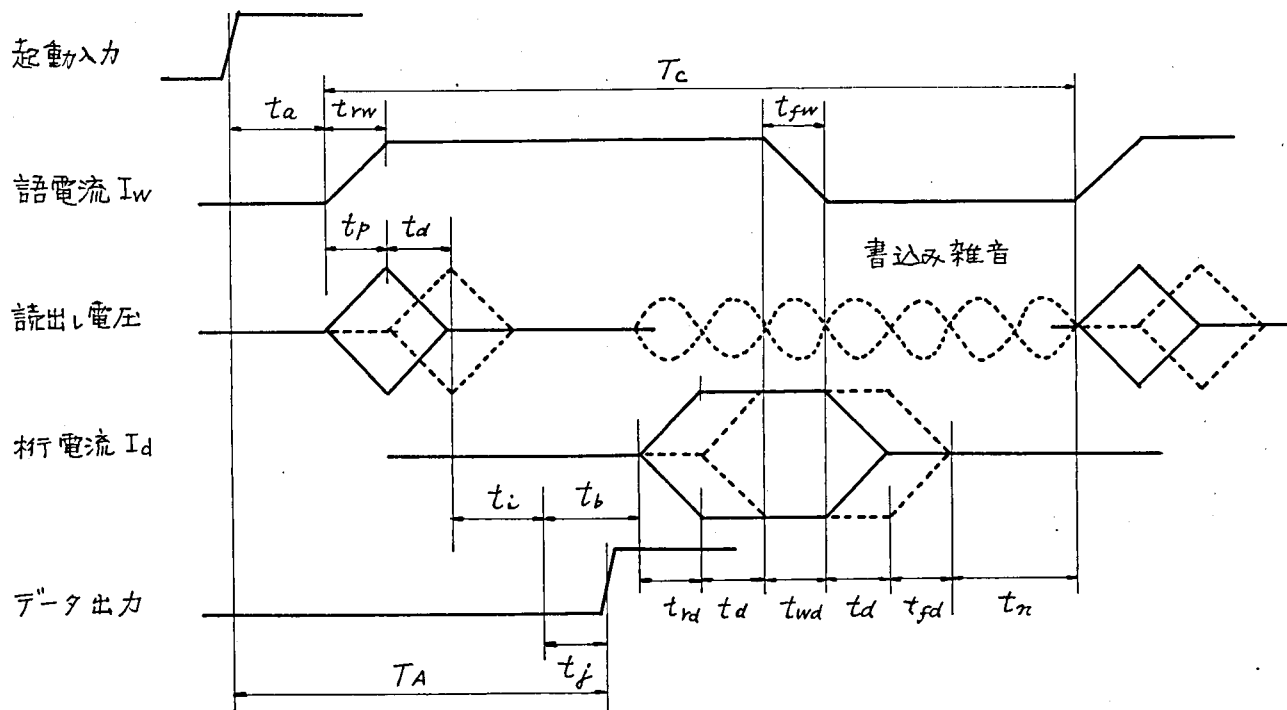


図 3.8 1 サイクル時間 T_c およびアクセス時間 T_A の要因

t_b = 桁系論理回路，駆動回路の応答時間。

t_{rd} = 桁電流立上り時間。

t_{wd} = 桁線の信号伝播時間を考慮にいたれた桁電流の実効パルス幅。3.4.4の検討から，

最小パルス幅は語電流立下り時間 t_{fw} にほぼ等しくしうる。

t_{fd} = 桁電流立下り時間。

t_n = 桁電流の終了時点をもととして，書込み雑音が収束するまでの時間。

とすると，サイクル時間 T_c およびアクセス時間 T_A の限界値は

$$T_c = t_{rw} + t_i + t_b + t_{rd} + t_{fw} + t_{fd} + t_n + 3t_d \quad (3.19)$$

$$T_A = t_a + t_{rw} + t_d + t_i + t_j \quad (3.20)$$

として得られる。このうち t_a は，実験装置において4ビット分のアドレス・データのデコードしか行っていないので，全実装の場合には，図3.79に示した時間よりも長くなる。

いまサイクル時間を制限する要因についてみると，実験装置で得られた概略値は次の通りである。

$$t_{rw} = 60 \text{ ns}$$

$$t_d = 30 \text{ ns}$$

$$t_i = 75 \text{ ns}$$

$$t_b = 65 \text{ ns}$$

$$t_{rd} = 20 \text{ ns}$$

$$t_{fw} = 60 \text{ ns}$$

$$t_{fd} = 20 \text{ ns}$$

$$t_n = 100 \text{ ns}$$

したがって， $T_c = 490 \text{ ns}$ が得られる。

この内訳は

1) 周辺回路， 300 ns (61.3%)

語駆動系 120 ns (24.5%)

桁駆動系 105 ns (21.4%)

センス系 75 ns (15.4%)

2) 書込み雑音， 100 ns (20.4%)

3) 記憶スタック内信号伝播時間 90 ns (18.3%)

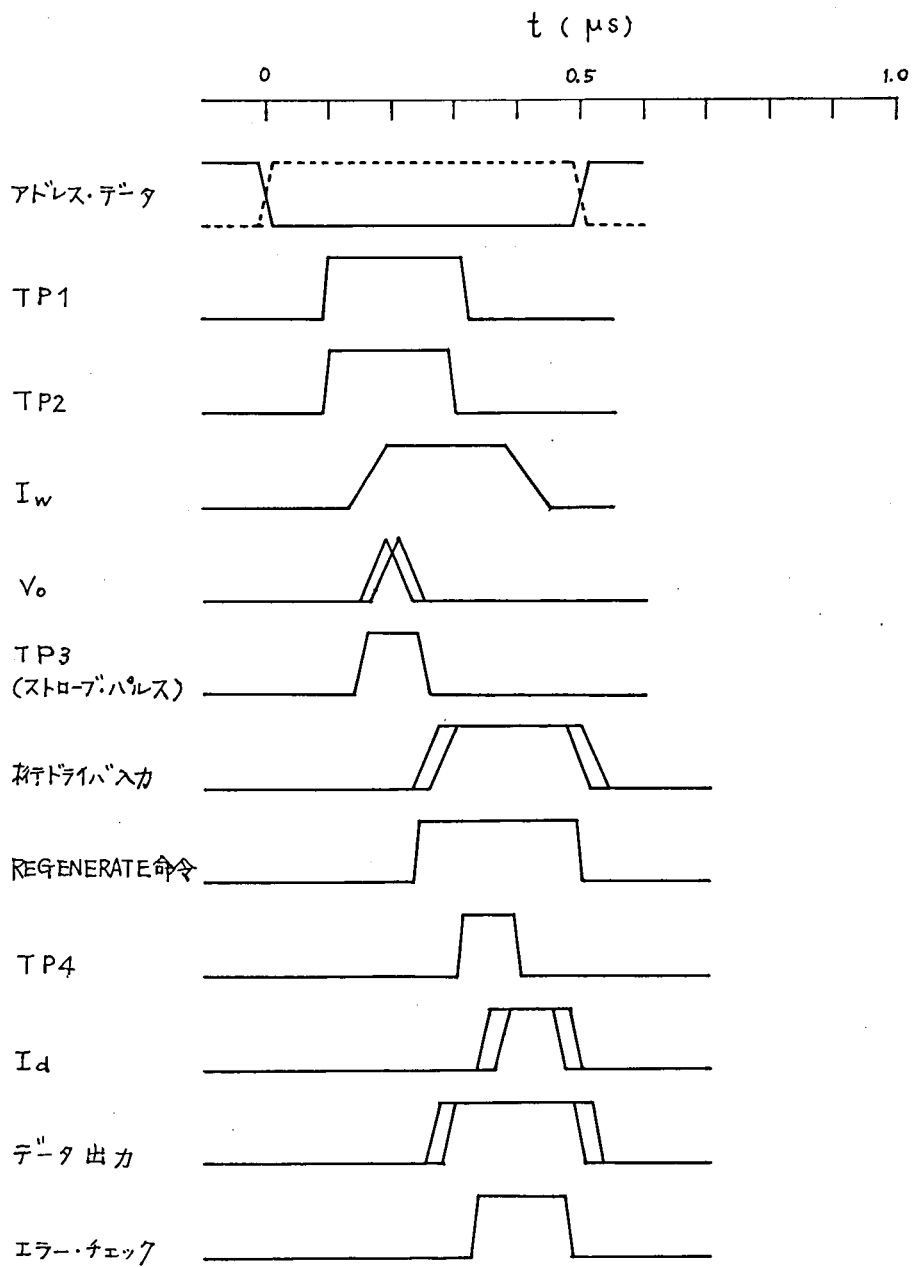


図 3.82 タイミング・チャート (サイクル時間 500 ns)

である。

このうち語駆動系の立上り時間については、実験装置において語線端子と回路間を約 50 cm の対撚線で接続していることに一因がある。しかし、より一層の高速化をはかるには周辺回路構成の改善が必要であることは明らかである。書込み雑音の軽減のためには、桁電流の低減、表・裏両サブ・スタックの対をなす桁線路間の電氣的平衡性の改善が必要である。またスタック内信号伝播時間の短縮には、語線間隔をつめて高密度化をはかることが重要であり、語線に近接して保磁子を配置するのが効果的である。⁽⁷¹⁾

サイクル時間 500 ns におけるタイミング・チャートを図 3.82 に、また読出し電圧波形を図 3.83 に示した。写真から明らかなように、信号対雑音比からみて、周辺回路系を改善することによりタイミングをつめうる時間余裕が存在する。

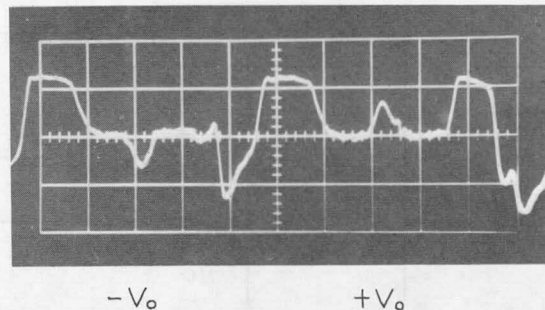


図 3.83 サイクル時間 500 ns における読出し電圧波形
(100 ns / HORIZ. DIV.)

3.5.3 動作電流振幅の許容範囲

実験に使用したエクササイザの性能上の制限から、磁性線記憶に適した最悪パルス系列で試験することはできなかったが、サイクル時間 1 μ s における、動作電流値に対する記憶情報の保持機能——読出し・再書込み動作の安定度を調べる目的で実験を行なった。

図 3.84 にエクササイザ動作の流れ図を示す。すなわち、全番地に情報を負荷したのち、全番地を巡回しながら読出し——再書込みを行ない、読出し情報と負荷情報の一致をとって誤り検出する。語電流および桁電流の振幅を可変して安定動作領域を求め、図 3.85 に示した。

部分実装した 3 桁分とも同一情報とし、番地に沿って次の各種パターンを負荷して測定した。

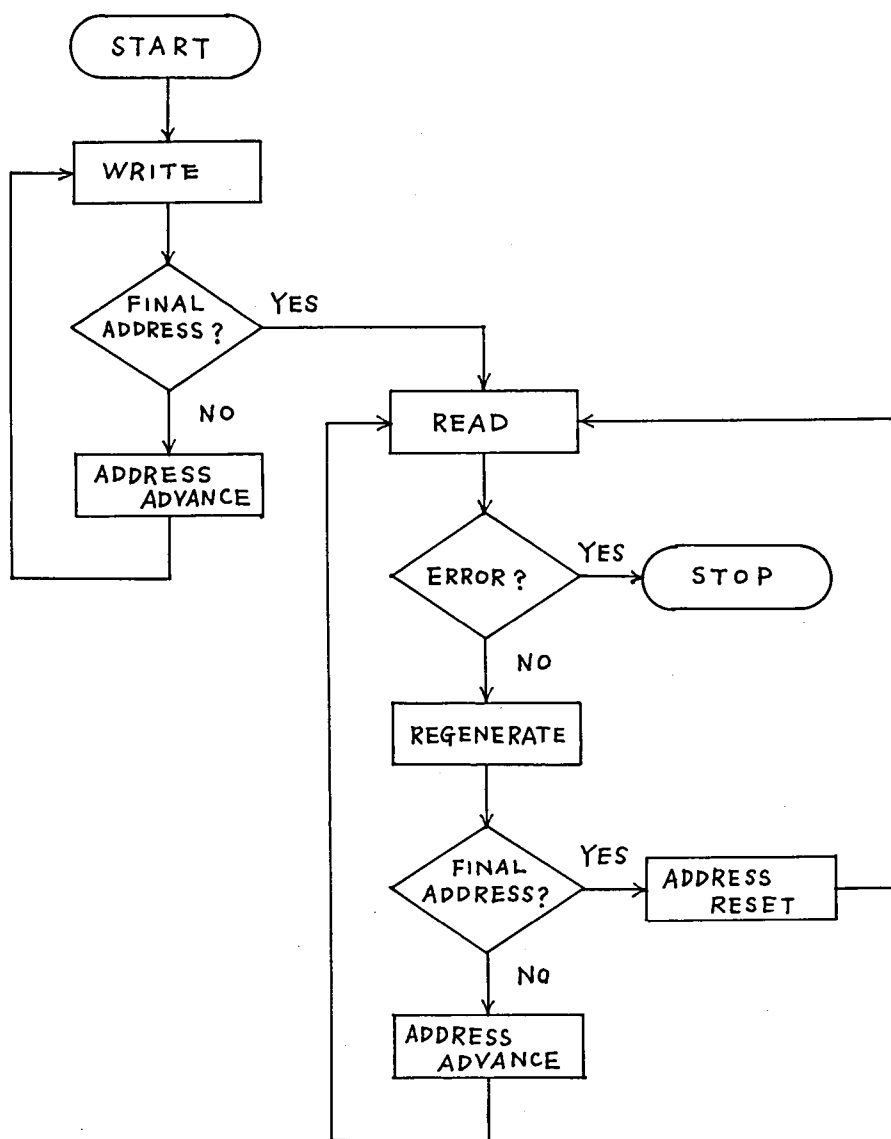


図 3.8 4 エクササイザ動作の流れ図

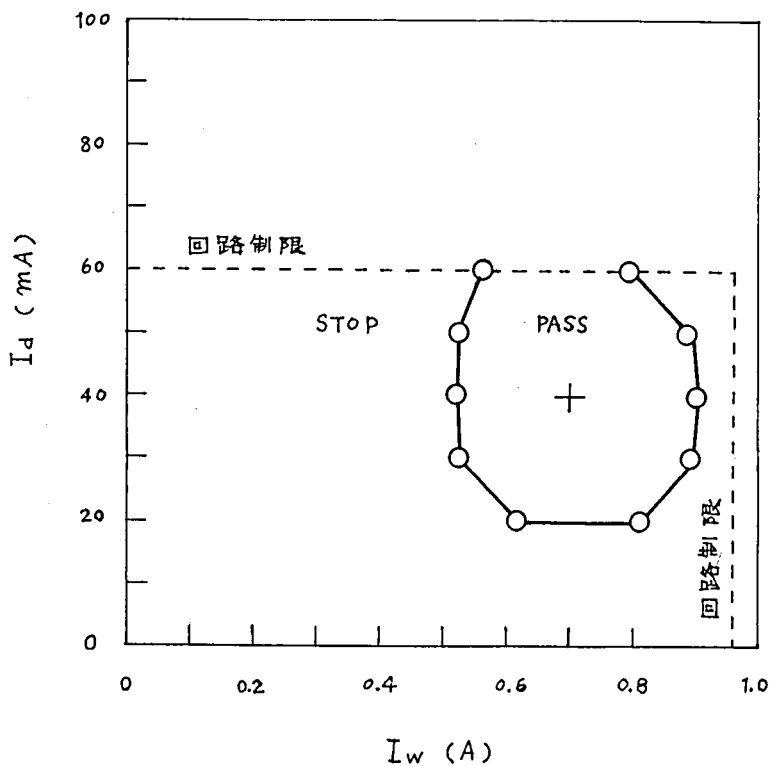


図 3.8 5 サイクル時間 $1 \mu\text{s}$ における
読出し—再書き込み動作の余裕度

- 1) All 1
- 2) All 0
- 3) 1 0 1 0 1 0 1 0 1 0 1 0 1 0 1 0
- 4) 1 0 0 0 1 0 0 0 1 0 0 0 1 0 0 0
- 5) 0 1 1 1 0 1 1 1 0 1 1 1 0 1 1 1
- 6) 1 0 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1
- 7) 0 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
- 8) 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 0
- 9) 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 0 1

両隣接ビットに高々1回の補数書き込み妨害が加わる他は桁電流妨害だけなので、各パターンとも大きい差はみられなかった。図 3.8 5 において動作領域の右端を制限している試験パターンは、比較的きびしいとみられる(6)~(9)であった。

比較的単純な試験情報パターンに対してではあるが、語電流 $\pm 200 \text{ mA}$ 、桁電流 ± 20

mA の広い動作領域が得られたことから、サイクル時間 $1\ \mu\text{S}$ における読出し——再書込み動作は安定であると結論できる。

3.5.4 本章の概要

設計検討において目標とした磁性線ケーブル記憶スタックの動作速度について評価、検討を行なうために、部分実装した実験用記憶装置を試作し、システム・エクササイザによって試験を行なった。

まず、試作装置の構成について説明し、サイクル時間 $1\ \mu\text{S}$ における動作結果から、充分に余裕時間をもって安定に動作しうることを結論した。

サイクル時間、アクセス時間などの動作速度を支配する時間的要因について分析を行い、周辺回路に改良を施さない段階でもサイクル時間 500ns で動作しうることを、実験的にも示した。また、さらに高速化をはかるために必要な検討事項について述べた。

単純な試験パターンに対してではあるが、広い動作電流許容範囲が得られたことから、サイクル時間 $1\ \mu\text{S}$ における読出し——再書込み過程が安定であることを結論した。

3.6 結 論

銅合金線の表面にパーマロイを電気めつきした円筒形磁性薄膜が、磁性薄膜としての特長の他に、連続して一括生産できること、記憶素子としての構成が単純で量産性を有していること、などに着目し、テープ・ケーブル状に成形した磁性線記憶素子を開発し、記憶容量 10 万ビット規模の記憶スタックを試作、検討して、所期の性能が得られたことを明らかにした。

この結果から、電子交換機用として、磁性線ケーブル記憶素子が、経済性、信頼性、大容量化などの要求を満足しうることを結論した。

本研究の内容は次の3項に大別される。

第一は、テープ・ケーブル状にした磁性線記憶素子の試作と、仕上り形状寸法、磁性線の特性変化などの点からするケーブル成形条件の検討である。第二は、信頼性、経済性に重点をおいた、記憶容量 10 万ビット規模の磁性線ケーブル記憶スタックの設計に関する電氣的、機構的検討である。また第三は、試作記憶スタックおよび部分実装した周辺回路

と接続した実験用記憶装置による、磁性線ケーブル記憶スタックの特性検討と評価である。

本研究において得られた成果は次の通りである。

- 1) テープ・ケーブル状にした磁性線記憶素子を開発して実用しうる特性が得られることを示し、その適切な製造条件を明らかにした。
- 2) 磁性線ケーブルと語線テープ・ケーブルとをはり合わせて折りたゝむことにより、信頼性の高い大容量記憶スタックが経済的に製造しうることを示し、記憶スタックの電氣的、機構的設計条件を検討し、設計に必要な基礎データを明らかにした。
- 3) 10万ビット規模の記憶スタックを試作して測定、評価試験を行ない、設計目標値を満足する性能が得られたことを示した。さらに周辺回路を部分実装した実験用記憶装置について動作速度の検討を行ない、サイクル時間を支配する時間因子の分析から、サイクル時間500nsをきる動作速度が達成しうることを結論した。

今後に残された重要な研究課題は、磁性線製造技術の改良である。とくにテープ・ケーブル化に必要な長尺にわたって、特性ばらつきの少ない磁性線を高い歩留で得ることは、経済化の総合的な達成にとって不可欠である。

また磁性線ケーブル記憶装置全体としては周辺回路の改良が必要であり、回路構成の簡潔化、部品点数の減少、語ならびに桁駆動回路、センス回路など直接周辺回路の集積回路化などが信頼性、経済性向上の点から必要である。

記憶スタックと周辺回路間の相互接続については、必要な直接周辺回路部分を記憶スタック内に収容して、相互接続点数の減少、安定化をはかる必要がある。すなわち語駆動系については、番地選択マトリクスを記憶スタック内の基板上に設置することにより、記憶スタックの端末数は4096語規模で1/30にも減少する。また桁系についても、とくにセンス回路の記憶スタック内収容は、記憶スタックと外部回路とのインターフェイスが、低レベルのアナログ信号にかわって比較的高レベルのデジタル信号で行なわれることになるので安定化に有利である。

第4章 本研究の要約とその成果

磁性薄膜が記憶素子としてすぐれた性能をそなえていることに着目し、高性能で安定な磁性薄膜記憶素子の開発を目的として、動作速度の向上ならびに信頼性、経済性の改善について研究を行なった。

本研究の内容は2部からなる。

第一部は、平面形磁性薄膜記憶素子に関するものであり、開磁路構造をもつ磁性薄膜とそれに近接して配置した導体板とで構成される、渦電流磁界を利用した非破壊読出し記憶素子を開発し、高速性に主眼をおいて検討を実施した。

第二部は、円筒形磁性薄膜記憶素子に関するものであり、円周方向に容易軸をもつ閉磁路形磁性線テープ・ケーブルを開発し、大容量化、経済化、信頼性の向上に主眼をおいて検討を実施した。

本研究によって得られた主な成果は次の通りである。

- 1) 平面形磁性薄膜による非破壊読出し記憶素子の開発によって、高速読出し動作を可能にした。
- 2) 非破壊読出し動作がきわめて安定であることを理論的、実験的に明確にした。
- 3) 円筒形磁性薄膜によるテープ・ケーブル形記憶素子の開発によって、磁性薄膜記憶の大容量化、信頼性の向上を可能にした。
- 4) 語線テープ・ケーブルをはり合わせた磁性線ケーブル記憶スタックによって、磁性薄膜記憶の経済化を可能にした。

本研究における検討から、平面形磁性薄膜記憶素子は高速・小容量記憶に、円筒形磁性薄膜記憶素子は中速、大容量記憶に、それぞれ適用領域を有するものと判断される。

謝 辞

本研究の遂行にあたっては、電気通信研究所福井憲一博士から御指導、御教示をいただいた。また京都大学教授前田憲一博士、元電気通信研究所喜安善市博士、元電気通信研究

所三輪高明博士から御激励をいただいた。

本研究の実施においては、電気通信研究所の磁性材料、記憶部品、記憶装置関係部門における各位から御援助、御討論をいただき、試作実施にあたっては沖電気工業株式会社、沖電線株式会社、日本電気株式会社、東北金属工業株式会社、東光株式会社に御協力をいただいた。

本論文をまとめるにあたっては、京都大学教授田中哲郎教授から懇切なる御指導をたまわった。

また本論文をまとめる機会にあたっては、東光株式会社田中太兵衛社長、同社樋田寛専務取締役、同社佐份利治博士の御高配をいただいた。

これらの方々に対して深く感謝の意を表する。

文 献

- 1) M. S. Blois: "Preparation of Thin Magnetic Films and Their Properties", J. appl. Phys., 26, 8 (1955-08).
- 2) A. V. Pohm, S. M. Rubens: "A Compact Coincident-Current Memory", Proc. of East. Joint Comp. Conf. (1956-12).
- 3) J. I. Raffel: "Operating Characteristics of a Thin Film Memory", J. appl. Phys., 30s, 2 (1959-04).
- 4) D. O. Smith: "Static and Dynamic Behavior of Thin Permalloy Films", J. appl. Phys., 29, 3 (1958-03).
- 5) C. D. Olson, A. V. Pohm: "Flux Reversal in Thin Films of 82%Ni, 18%Fe", J. appl. Phys., 29, 3 (1958-03).
- 6) L. Landau, E. Lifshitz: "The Theory of the Dispersion of Magnetic Permeability in Ferromagnetic Bodies", Physik. Zeits. Sowjetunion, 8, 2 (1935).
- 7) W. Dietrich, W. E. Proebster, P. Wolf: "Nanosecond Switching in Thin Magnetic Films", IBM Jour., 4, 2 (1960-04).
- 8) J. I. Raffel, T. S. Crowther et al.: "Magnetic Film Memory Design",

- Proc.IRE,49,1 (1961-01) .
- 9) E.M.Bradley: "A Computer Storage Matrix using Ferromagnetic Thin Films", Jour.Brit.IRE,20,10 (1960-10) .
 - 10) 新田,石井: "ETL Mk-6p の強磁性薄膜記憶装置", 昭38 連大予稿, 423 (1963-04) .
 - 11) 千葉,田中: "128語磁性薄膜記憶装置", 信学会計算機研資 (1963-12) .
 - 12) D.A.Meier: "Millimicrosecond Magnetic Switching and Storage Element", J.appl.Phys.,30s,4 (1959-04) .
 - 13) U.F.Gianola: "Nondestructive Memory employing a Domain Oriented Steel Wire", J.appl.Phys.,29,5 (1958-05) .
 - 14) T.R.Long: "Electrodeposited Memory Elements for a Non-Destructive memory", J.appl.Phys.,31s,5 (1960-05) .
 - 15) 大島,上林: "ワイヤメモリマトリックスの特性", 昭38 信学全大予稿, S7-10 (1963-11) .
 - 16) 前田,松下,他: "織成メモリマトリックスの構造および諸特性", 昭38 信学全大予稿, S7-11 (1963-11) .
 - 17) 新田,石井,松本: "ETL Mk-6 の磁性薄膜記憶装置", 信学会計算機研資 (1964-06) .
 - 18) I.Danylchuk,A.J.Perneski,N.W.Sagal: "Plated Wire Magnetic Film Memories", 1964 Proc.INTERMAG Conf. (1964-04) .
 - 19) L.Néel: "Anisotropie Magnétique Superficielle et Surstructures D'orientation", Jour.Phys.Radium,15,4 (1954-04) .
 - 20) S.Taniguchi: "A Theory of the Uniaxial Ferromagnetic Anisotropy induced by Magnetic Annealing in Cubic Solutions", Sci.Res.Inst.,Tohoku Univ.,A7,1 (1955-06) .
 - 21) S.Chikazumi: "Study of Magnetic Annealing on Ni₃Fe Single Crystal", J.Phys.Soc.Japan,11,5 (1956-05) .
 - 22) D.O.Smith: "Anisotropy in Permalloy Films", J.appl.Phys., 30s,4 (1959-04) .
 - 23) G.Robinson: "Anisotropy in Polycrystalline Nickel-Iron Thin

- Films in the Composition Range 40-100% Nickel", Int. Conf. on Magnetism and Crystallography, Kyoto, Japan (1961) .
- 24) M.Takahashi: "Induced Magnetic Anisotropy of Evaporated Films formed in a Magnetic Field", Jour.appl.Phys., 33s, 3 (1962-03) .
 - 25) H.W.Fuller, M.E.Hale: "Determination of Magnetization Distribution in Thin Films using Electron Microscope", Jour. appl.Phys., 31, 2 (1960-02) .
 - 26) M.S.Middelhoek: "Ferromagnetic Domains in Thin Ni-Fe Films", Ph.D.Thesis, Univ. of Rotterdam (1961) .
 - 27) R.C.Flaker, F.J.Kosper: "Long Term Aging of Thin Magnetic Films of Nickel-Iron", 1963 Proc. INTERMAG Conf. (1963-04) .
 - 28) J.T.Chang, U.F.Gianola, M.W.Sagal: "Aging and Stabilization of Electrodeposited Cylindrical Magnetic Thin Film", Jour.appl. Phys., 35, 3, part 2 (1964-03) .
 - 29) S.Middelhoek: "Domain Wall Creeping in Thin Permalloy Films", IBM Jour., 6, 1 (1962-01) .
 - 30) W.Dietrich: "Partial-Switching Processes in Thin Magnetic Films", IBM Jour., 6, 3 (1962-07) .
 - 31) 山中, 小山: "磁性薄膜記憶における妨害情報パルスの影響", 昭 38 信学全大予稿, S7-4 (1963-11) .
 - 32) T.H.Beeforth, P.J.Hulyer: "A New Explanation of Domain Wall Creep in Thin Magnetic Films", Nature, 199, 4895 (1963-08) .
 - 33) A.Green, K.D.Leaver, M.Prutton: "Origin of Domain-Wall Creeping in Magnetic Films", Jour.appl.Phys., 35, 3, part 2 (1964-03) .
 - 34) A.L.Olson, E.J.Torok: "Magnetization Creep in Nickel-Iron Films via Lever Mechanism", Jour.appl.Phys., 37, 3 (1966-03) .
 - 35) R.L.Copger, J.L.Tominson: "Magneto-Optic Readout for Computer Memories", Jour.appl.Phys., 33s, 3 (1962-03) .
 - 36) P.Huijser: "Magnetoresistive Readout of Thin-Film Memories", 1962 Int.Solid-State Ccts.Conf. (1962-03) .

- 37) L.J.Oakland,T.D.Rossing:"Coincident-Current Nondestructive Readout from Thin Magnetic Films",*Jour.appl.Phys.*,
30s,4 (1959-04) .
- 38) 渡辺:"磁性薄膜を用いた半固定記憶素子",昭37 信学全大予稿 (1962-11)
- 39) 中込,上林,天野,大島:"永久磁石を用いた電着線記憶回路",信学会電算機研
資 (1965-05) .
- 40) 山中,富永:"磁性線による半固定記憶",信学会計算機研資 (1965-05) .
- 41) 前田,松下,高島,他:"NDRO ワイヤメモリを用いた高速大容量記憶装置",昭
40 信学全大予稿 (1965-11) .
- 42) J.W.Hart:"Patterns in Thin Films make Fast Nondestructive
Memories",*Electronics*,34,7 (1966-02) .
- 43) R.M.Sanders,T.D.Rossing:"Reversible Rotation in Magnetic
Films",*Jour.appl.Phys.*,29,3 (1958-03) .
- 44) 後藤,相馬,他:"電気メッキによるパーマロイ薄膜の生成とそのパラメロン及
びメモリ特性について",信学会計算機研資 (1960-05) .
- 45) S.Tolansky:*Multiple Beam Interferometry of Surface Films*,
Oxford Univ. Press (1948) .
- 46) T.S.Crowther:"Techniques for Measuring the Angular Dispersion
of the Easy Axis of Magnetic Films",MIT Lincoln Labo.,
GR51-2 (1959-02) .
- 47) E.C.Stoner,E.P.Wohlfarth:"A Mechanism of Magnetic Hysteresis
in Heterogeneous Alloy",*Phyl.Trans.Roy.soc.*,240A,4 (1948) .
- 48) A.V.Pohm,E.N.Mitchell:"Magnetic Film Memories,A Survey",
IRE Trans.,EC-9,3 (1960-09) .
- 49) 山中:"パーマロイ薄膜パルス応答の角度ヒステリシスと非破壊読出し記憶の可能
性",通研経過資料,1369号 (1963-09) .
- 50) 山中:"磁性薄膜による非破壊読出し記憶の新しい可能性",信学誌,46,
12 (1963-12) .
- 51) 山中:"磁性薄膜の非破壊読出し記憶",信学会計算機研資 (1964-01) .
- 52) 山中,伊藤:"パーマロイ薄膜の超高速パルス応答",通研経過資料,

1139 号 (1962-06) .

- 53) 山中, 小山: " 磁性薄膜による非破壊読出し一時記憶 " , 信学会計算機研資 (1965-09) .
- 54) 山中: " 磁性薄膜による非破壊読出し記憶 " , 研実報 , 15, 4 (1966-04) .
- 55) L.Néel: " Remarques sur la théorie des propriétés magnétique des couches minces et grais fins " , J.Phys.Radium, 17, 3 (1956-03) .
- 56) K.Y.Ahn: " Magnetic Properties observed during Vacuum Deposition of Permalloy Films " , J.appl.Phys., 37, 3 (1966-03) .
- 57) 森岡, 高橋, 他: " 80% ニッケルパーマロイ電着膜製造法とその磁気特性 " , 日本金属学会誌 , 25, 10 (1961-10) .
- 58) A.Brenner: " Electrodeposition of Alloys (I) " , Academic Press (1963) .
- 59) O.H.Cockett, E.S.Spencer-Timms: " Variation of Composition with Thickness in Thin Electrodeposited Films of Nickel-Iron Alloys " , Jour.of Electrochem.Soc., 108, 9 (1961-09) .
- 60) T.R.Long: " Magnetoelastic Sensitivity and Composition of Permalloy Films " , Jour.appl.Phys., 37, 3 (1966-03) .
- 61) K.Grund: " Das Schaltverhalten von Ringförmigen Permalloy-Schichten mit Dicken von 0.2 μ m bis 20 μ m " , Arch.elect.Übertragung, 18, 8 (1964-08) .
- 62) 福井, 別所: " 電子交換用記憶装置 " , 通研経資 1966 号 (1965-12) .
- 63) T.Yoshida, et al.: " Sumiflat Cable (Tape-shaped Cable) " , Sumitomo Elec.Tech.Rev., 5 (1965-01) .
- 64) W.D.Bohannon Jr., J.J.Kaltenthaler: " Twistor Cable-A Case in Precision Laminating " , The Western Elec.Engr., 6, 7 (1962-07) .
- 65) 山中, 福田, 小山: " フラット・ケーブル化した円周方向容易軸磁性線による一時記憶 " , 通研成報 2868 号 (1966-04) .
- 66) 山中, 富永, 福田, 福井: " フラット・ケーブル化した磁性線の記憶特性 " , 信学部品材料研資 (1966-04) .

- 67) 四元，山中：「磁性線一時記憶における駆動特性の検討」，通研経資
2075号(1966-05)。
- 68) 電気通信学会編：「通信工学ハンドブック」，丸善，P.156(1957)。
- 69) 宇田川：「電磁気学」，オーム社，P.341，P.346(1964)。
- 70) 二宮，小池，酒井，他：「円筒型強磁性薄膜を用いた記憶回路の一方式」，昭39
信学全大，579(1964-11)。
- 71) 山中，中川：「フェライト保磁子による磁性線ケーブル一時記憶の高密度化」，
昭41 信学全大，749(1966-11)。

発表論文一覧表

- (2-1) 山中：「磁性薄膜による非破壊読出し記憶の新しい可能性」，電気通信学会雑
誌，46巻，12号(1963年12月)。
- (2-2) 山中：「磁性薄膜の非破壊読出し記憶」，電気通信学会電子計算機研究会
(1964年1月)。
- (2-3) 山中，小山：「磁性薄膜による非破壊読出し一時記憶」，電気通信学会電子計
算機研究会(1965年9月)。
- (2-4) 山中：「磁性薄膜による非破壊読出し記憶」，電気通信研究所研究実用化報告，
15巻，11号(1966年4月)。
- (3-1) 山中，福田，小山：「フラット・ケーブル化した円周方向容易軸磁性線による
一時記憶」，電気通信研究所成果報告，2868号(1966年4月)。
- (3-2) 山中，富永，福田，福井：「フラット・ケーブル化した磁性線の記憶特性」，
電気通信学会部品材料研究会(1966年4月)。